MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE
INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

16me FASCICULE — TEXTE

TRAITÉ DES EAUX

2e PARTIE

Distributions d'eau

AVEC 15 PLANCHES

PARIS
DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1875

Droits de reproduction et de traduction réservés

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION. 1

CHAPITRE I

Mouvement de l'eau dans les tuyaux. — Formules pratiques.

Répartition des vitesses dans la section d'un tuyau. 3
LOIS ET FORMULES EXPÉRIMENTALES DU MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES TUYAUX. . . . . .
La résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau. 4
La résistance est indépendante de la pression. 4
La résistance dépend de la nature des parois. 5
La résistance dépend de la vitesse d'écoulement. 5
Expériences diverses sur l'écoulement dans les tuyaux. 6
Formule pratique fondamentale. 6
Formule monôme de Dupuit. 8
Formule monôme de Darcy. 9
Tableau des coefficients de résistance des tuyaux neufs en fonte, d'après Darcy. . . 11
Relations entre le rayon r *de la conduite, la charge* j *par mètre courant, le débit* q *et la vitesse moyenne* u. 13
PREMIER PROBLÈME. Connaissant le rayon et la charge, déterminer la vitesse et le débit. 14
DEUXIÈME PROBLÈME. Connaissant le rayon et le débit, déterminer la vitesse et la charge. . 14
TROISIÈME PROBLÈME. Connaissant le rayon et la vitesse, déterminer le débit et la charge. 14
QUATRIÈME PROBLÈME. Connaissant la charge et le débit, déterminer le rayon et la vitesse. 14
CINQUIÈME PROBLÈME. Connaissant la charge et la vitesse, déterminer le rayon et le débit. 15
SIXIÈME PROBLÈME. Connaissant le débit et la vitesse, déterminer la charge et le rayon. 15
Résolution du premier et du quatrième problèmes dans le cas d'une conduite cylindrique faisant communiquer deux réservoirs. 15
Exemples numériques de cette résolution. . 17
Construction de la ligne de charge. 18
Description des expériences de Darcy. . . . 19
Pertes de charge produites par les changements de diamètre. 22
Pertes de charge produites par les branchements. 23
Pertes de charge produites par les coudes. 23
Action de la force centrifuge dans les coudes. 23
TUYAUX A DIAMÈTRE OU A DÉBIT VARIABLES. . . . 24
Équation fondamentale du mouvement varié. 24
1° *Conduites simples à diamètre variable et à débit constant*. 25
Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de même longueur et de rayon constant. 26
Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de rayon déterminé. 27
Avantage qu'il y a à réunir plusieurs conduites en une seule. 28
Influence du nombre des conduites sur le prix de leur établissement. 28
La recherche des conduites équivalentes suppose l'égalité des charges. 29
2° *Conduites simples à diamètre constant et à débit variable*. 29
Conduite simple à diamètre constant, avec service de route uniforme. 29
Comparaison entre un service de route uniforme et un service égal à l'extrémité. . . 30
Conduite simple à diamètre constant, avec service mixte. 31
Conduite simple à diamètre et à débit variables. 32
Calcul des conduites complexes ou d'un système entier de conduites. 33
Conduites complexes avec réservoirs. 37
Réservoirs destinés à augmenter le débit momentané des conduites. 37
Orifice alimenté par deux réservoirs. 38
Conduite bifurquée alimentant deux réservoirs de niveau différent. 39
Conduite alimentée par deux réservoirs. . . 45
Influence prépondérante du diamètre des conduites. 46
Des orifices qui terminent les conduites. . . 46
Jets d'eau. 47
Influence du profil en long d'une conduite sur son débit. 48
Influence de la pente d'une conduite sur les

pressions intérieures. 49
Influence exercée par l'air confiné sur le débit d'une conduite. 54
Du siphon. 56
Dégagement de l'air dans le siphon. 57
Siphon renversé. — Conduite forcée. 58
Écoulement intermittent par siphon. 58

CHAPITRE II.

Quantité et qualité des eaux.

Quantité d'eau à distribuer dans une ville. . 60
Qualités des eaux. 63
1° Eau de pluie. 64
2° Eau de rivière. 64
3° Eaux de source et de puits. 65
Analyse d'une eau. 65
Hydrotimétrie. 66
Caractères des eaux potables. 67
Résumé des qualités d'une eau potable. . . 68
Du choix à faire entre les eaux de sources et les eaux de rivières. 69
Du filtrage des eaux. 71
Lois de l'écoulement de l'eau à travers le sable et les terrains perméables. 71
Action des filtres 72
Action sur les matières en suspension. . . . 73
Action sur les corps en dissolution. 73
Action sur les matières organisées. 74
Absorption des gaz. 75
Filtres artificiels. 75
Clarification par le repos. 75
Filtres en sable et gravier, de Chelsea. . . . 76
Filtres de Southwark. 76
Filtres de Thomas Ditton. 77
Filtres d'York. 77
Établissement de Hull. 78
Filtres de Paisley, en Écosse. 79
Filtres de Marseille 80
Filtration au charbon. 82
Prix de revient du filtrage. 84
Filtres de Dunkerque. 84
Filtres de Berlin. 85
Filtres à grand débit. 85
Filtres à couches de sable verticales. 86
Filtres naturels. 86
Filtre naturel de Nottingham. 86
Filtres de Toulouse. 86
Galeries filtrantes de Lyon. 87
Galeries filtrantes des eaux de Nîmes. . . . 88
Comparaison des distributions d'eaux filtrées et des distributions de sources dérivées. 89
Petits filtres en usage dans l'économie domestique. 91
Filtre en grès. 91
Filtres ordinaires avec sable de rivière, charbon ou éponges. 92
Filtres Fonvielle. 93
Filtres en laine. 94
Des filtres à l'Exposition universelle de 1867. 94
Moyen d'éviter le mélange des eaux courantes au confluent de deux cours d'eau. . . 95

CHAPITRE III.

Sources et puits.

Origine des sources. 97
Influence de la perméabilité du sol sur la position et la puissance des sources. . . . 102
1° Sources des terrains imperméables. . . . 105
2° Sources des terrains perméables. 105
3° Niveaux d'eau. 105
4° Puits artésiens. 105
De l'art de découvrir les sources. 105
La géologie est le seul guide dans la recherche des sources. 105
Chercheurs de sources anciens et modernes. 106
Méthode de l'abbé Paramelle. 108
Des sources artificielles. 111
Observations sur la création des sources artificielles. 115
Distribution d'eau de Liége. 116
Fontaine de Vaucluse. 116
Distribution d'eau de Hagueneau. 117
Citernes. 118
Citernes filtres de Venise. 119
Puits ordinaires. 119
Insalubrité des puits des villes. 119
Puits instantanés. 121
Théorie des puits. 123
Écoulement à travers un terrain perméable. 123
Calcul d'un puits ordinaire. 123
Faible influence du rayon du puits. 125
Définition du puits artésien. 126
Théorie du puits artésien. 127
Importance pratique des grands diamètres pour les puits artésiens. 129
Détermination du niveau piézométrique d'un puits artésien. 130
Existence de courants souterrains 130
Détails sur quelques puits artésiens. . . . 131
Puits de Grenelle 131
Puits de Passy. 133
Puits artésiens de Tours 134
Puits de la Butte-aux-Cailles et de la place Hébert, à Paris 134
Puits de Rochefort 135
État actuel des travaux de sondage 136

CHAPITRE IV.

Distributions d'eau par dérivation.

1° Eaux de Rome 137
2° Distribution d'eau d'Avallon. 139
3° Distribution d'eau de Dijon. 141
Constance de température dans les distributions d'eau de source. 143
Augmentation du débit par l'abaissement de l'orifice de la source. 144
Profils en travers de l'aqueduc 145
Prises d'eau 145
Ponts-aqueducs 146
Distribution intérieure : réservoirs. 147
4° Distribution d'eau de Marseille. 150
Aqueduc de Roquefavour 151
5° Distribution d'eau de Saint-Étienne . . . 152
Construction de divers types d'aqueduc en ciment 154
Leur prix de revient 155
Captage des sources 156
6° Distribution d'eau de New-York 158
7° Distribution d'eau de Washington 160
8° Distribution d'eau de Paris. 161
Historique 161
Etat actuel des eaux de Paris 164
Eaux de la Dhuis : réservoirs de Ménilmontant. 167
Eaux de la Vanne. 169
Considérations générales sur les aqueducs de dérivation. 169

CHAPITRE V.

Distributions d'eau par machines élévatoires.

Considérations générales. 171
Réservoir d'air 172
Nécessité d'un double système dans une grande ville. 173
1° Eaux de Toulouse. 173
2° Eaux de Marly et de Versailles 174
3° Eaux de Lyon. 178
Colonne en fonte de Montessuy. 179
4° Eaux de Nîmes. 180
Anciens aqueducs. — Pont du Gard 180
Description du projet exécuté. 181
Conduites en ciment. 182
5° Eaux d'Orléans 183
6° Distribution d'eau de Créteil. 184
7° Distribution d'eau de Lille. 185
Des réservoirs d'air comprimé. 187

CHAPITRE VI.

Éléments d'une distribution d'eau.

1° Des conduites 189
Conduites en bois 189
Conduites en ciment ou en poterie 190
Conduites en fonte. 192
1° Assemblage à emboîtement 192
2° Assemblage à brides 193
3° Assemblage à bague 194
Tuyaux à joint forcé. 194
Joint sphérique Doré 195
Joint à caoutchouc : joint Marini, joint Delperdange 195
Résistance des tuyaux 197
Machine à essayer les tuyaux. 198
Conduites en tôle, système Chameroy 198
Conduites en plomb. 199
Prix des conduites ; nombreux exemples . . 199
Importance des fuites dans les conduites . . 204
Pressions dues à la congélation de l'eau . . 204
Incrustations et dépôts dans les conduites. . 205
1° Dépôts calcaires. 205
2° Dépôts ferrugineux 205
Action de l'eau sur les conduites en plomb. . 207
2° Appareils accessoires des conduites : robinets, ventouses, etc. 208
Robinets à boisseau 208
Robinet vanne. 210
Robinet à clapet en caoutchouc. 211
Clapet ou robinet de décharge 211
Ventouses 212
Prix des robinets et ventouses 213
3° Appareils de distribution publique 215
De la multiplicité des bornes fontaines. . . 215
1° Bornes fontaines 216
2° Bouches d'arrosage. 217
3° Poteaux d'arrosage 218
4° Jets d'eau. 219
4° Appareils de distribution privée. 220
Principes généraux qui doivent régir le service privé, ... 220
Prise d'eau à collier. 222
Robinet de jauge. 222
Inconvénients du robinet de jauge; jauge piezométrique 223
Alimentation intermittente des réservoirs . . 224
5° Réservoirs. 225
Réservoirs de Lyon, d'Orléans. 225
Réservoir de Dunkerque 226
Réservoir aérien en tôle 226
Résistance des réservoirs en maçonnerie . . 227
Généralités sur les réservoirs. 228

CHAPITRE VII.

Égouts.

Rôle des égouts 230
Évacuation totale par les égouts. 230
Pente à donner aux égouts. 231
Conditions de construction. 231
Moyens de combattre les exhalaisons 232
Fermetures hydrauliques. 233
Description sommaire des égouts de Paris. . 233
Épuration des eaux d'égout. 234
Rapport de la commission chargée de proposer des mesures pour remédier à l'infection de la Seine aux environs de Paris. . . 235
1re partie. Constatation de l'infection de la Seine, causes de cette infection. 237
2e partie. Examen et choix des mesures à prendre pour remédier à l'infection de la Seine 245
Irrigation à l'eau d'égout. 248
Résumé et conclusions. 258

APPENDICE

Table I. Table donnant les vitesses en fonction des hauteurs de chute, calculée par la formule $(v = \sqrt{2gh})$. 262

Table II. Table donnant diverses fonctions du rayon et la valeur du coefficient b_1 pour des tuyaux depuis longtemps en service. . 266

Table III. Table nouvelle, calculée d'après les résultats des expériences de Darcy, donnant les charges, les vitesses et les débits correspondants, pour des tuyaux d'un diamètre variant de 0m,01 à 1m,50, ces tuyaux étant depuis longtemps en service 269
Bases ayant servi à l'établissement de la table III 278
Usages de la table III. 278

Table IV. Relations entre les volumes d'eau à écouler suivant l'unité du temps 281

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

TRAITÉ DES EAUX

DEUXIÈME PARTIE

DISTRIBUTIONS D'EAU — ÉGOUTS

INTRODUCTION

L'eau est nécessaire à tous les besoins de la vie ; c'est une œuvre éminemment philanthropique que de la mettre à la portée de tous et particulièrement à la portée des ouvriers et des pauvres.

Un grand écrivain, dit Arago, appelait la propreté une vertu. Un voyageur célèbre disait qu'il avait pu, presque partout, juger du degré de civilisation des peuples par leur propreté. Si vous introduisez de l'eau à bon marché dans la maison de l'ouvrier, si vous la faites parvenir jusqu'aux étages supérieurs où il réside et souffre, vous aurez rendu un immense service à la population.

L'eau n'est pas moins nécessaire à la salubrité des villes qu'à la santé des hommes. Quand une eau abondante parcourt chaque jour les ruisseaux de toutes les rues, elle entraîne les débris organiques et les ferments de corruption, elle purifie l'air et le sol.

L'intérêt même de la conservation des monuments veut qu'en tout point on puisse trouver une quantité d'eau suffisante pour éteindre un incendie, quelque important qu'il soit, et l'empêcher d'étendre ses ravages à tout un quartier.

Enfin, si l'on dispose d'une quantité d'eau considérable et qu'elle possède une pression suffisante, qui empêche de distribuer à domicile le travail mécanique et de le substituer dans les moindres métiers au travail musculaire de l'homme?

Les Romains s'étaient préoccupés d'amener des eaux courantes au sein de leurs

cités et les vestiges gigantesques de leurs ouvrages témoignent de l'importance qu'ils attachaient à cette question.

En France, les premières tentatives de distribution ne datent que de Louis XIV et elles n'avaient pour but que l'embellissement de la demeure royale. Ce n'est guère qu'au commencement de ce siècle qu'on s'est préoccupé d'assurer l'alimentation de Paris. Depuis lors, presque toutes les grandes villes se sont imposé des sacrifices pour se procurer des eaux abondantes. Néanmoins il reste beaucoup à faire; nombre de villes, de plus ou moins grande importance, sont encore privées d'eau, bien qu'il leur soit possible d'en obtenir à peu de frais.

L'étude des distributions d'eau présente donc une importance capitale. Nous diviserons cette étude en sept chapitres :

1er *Chapitre.* Recherche des lois du mouvement de l'eau dans les tuyaux; formules pratiques.
2e — Quantité et qualités des eaux. — Procédés de filtrage.
3e — Puits artésiens. — Sources naturelles et artificielles.
4e — Distribution d'eau par dérivation.
5e — Distribution d'eau par machines élévatoires.
6e — Éléments d'une distribution d'eau.
7e — Égouts.

Les égouts sont le corollaire obligé d'une distribution d'eau ; car, s'il est avantageux de répandre à profusion l'eau pure et limpide, il ne l'est pas moins d'emmener loin des habitations les déjections des villes et toutes les eaux chargées d'immondices et de détritus.

La distribution d'eau et le système d'égouts se complètent donc l'un par l'autre et constituent la circulation complète d'une ville, comme le système artériel et le système veineux constituent la circulation animale : le premier porte en tous les points du corps le sang rouge et pur qui répare les pertes de l'organisme, l'autre ramène le sang noir aux poumons qui le revivifient [1].

[1] Sur les conseils de l'éditeur, nous avons fait pour certaines parties de ce traité de larges emprunts à l'excellent ouvrage de Darcy intitulé : *Fontaines de Dijon.* — Cet ouvrage, aujourd'hui épuisé, renferme beaucoup de considérations et de résultats pratiques qu'il était utile de reproduire.

CHAPITRE PREMIER

MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES TUYAUX — FORMULES PRATIQUES

Répartition des vitesses dans la section transversale d'un tuyau. — Considérons un tuyau de longueur quelconque, mais de section constante, en communication avec un réservoir à niveau invariable. Quand l'eau pénètre dans le tuyau, elle s'avance irrégulièrement en chassant l'air, dont elle prend la place; puis, lorsque tout l'air a disparu, le régime permanent commence.

Ce régime est non-seulement permanent, mais encore uniforme; la vitesse moyenne dans une section transversale est partout la même, puisqu'il ne peut se produire de vide, de solution de continuité dans le courant liquide; la quantité d'eau qui passe pendant l'unité de temps dans une section transversale du tuyau est indépendante de la position de la section. Ainsi la vitesse moyenne est la même pour toutes les sections.

Mais les vitesses de tous les filets liquides qui traversent une section sont-elles les mêmes et égales à la vitesse moyenne? Non, les filets voisins des parois sont retardés dans leur mouvement et le retard diminue à mesure qu'on s'approche du filet central, de sorte que la vitesse de celui-ci est supérieure à la vitesse moyenne, tandis que la vitesse des filets pariétaux est inférieure à la vitesse moyenne.

Il est facile de reconnaître par une expérience bien simple l'existence d'une force retardatrice au contact des parois : prenez un tuyau de diamètre constant et de longueur variable, débouchant toujours à la même hauteur dans l'atmosphère et alimenté par un réservoir à niveau constant, la charge du liquide sur l'orifice de sortie sera toujours la même, quelle que soit la longueur du tuyau; si la vitesse moyenne ne dépendait que de cette charge, le débit serait constant; au contraire, si la vitesse est réduite par la résistance des parois, elle doit diminuer à mesure que la surface frottante augmente; le débit diminue, en effet, à mesure que la longueur du tuyau augmente.

Ainsi, la résistance à la paroi existe et, si dans l'expérience précédente on mesure les débits, on reconnaît que cette résistance augmente proportionnellement à la surface des parois mouillées, c'est-à-dire proportionnellement à la longueur du tuyau.

Cela posé, voici comment on peut comprendre la répartition des vitesses dans une section transversale du tuyau.

Divisons cette section en une série de surfaces annulaires comprises entre le centre et la circonférence intérieure du tuyau, la vitesse maxima sera au centre,

la vitesse minima à la périphérie et la vitesse ira croissant à mesure qu'on passera à une surface annulaire de plus grand rayon.

Le mouvement des divers éléments annulaires qui composent la masse liquide peut donc se comparer à celui des tubes d'un télescope emboîtés les uns dans les autres.

On a cherché à déterminer par l'expérience la répartition des vitesses ; cette recherche est difficile, eu égard aux appareils en usage pour la mesure des vitesses ; cependant, on a pu vérifier que les faits se passent comme nous venons de l'indiquer tout à l'heure.

La couche liquide en contact avec les parois est retardée, à son tour elle retarde la suivante, qui retarde la troisième et ainsi de suite ; si l'on connaissait les forces élémentaires dues à la cohésion et à la viscosité, on pourrait aborder par le calcul la question de répartition des vitesses.

Malheureusement, il n'en est rien ; c'est pourquoi nous ne reproduirons pas dans cet ouvrage purement pratique l'étude théorique de la répartition des vitesses.

On la trouvera dans le *Traité d'hydraulique* de M. Bresse et dans le remarquable mémoire de M. l'ingénieur Maurice Lévy, intitulé : *Théorie d'un courant liquide.*

M. Bresse arrive aux conclusions suivantes :

Les vitesses décroissent, à partir du filet central, comme les ordonnées d'un paraboloïde de révolution ayant même axe que le tuyau ;

Le filet qui possède la vitesse moyenne est toujours à une distance du centre comprise entre les $\frac{2}{3}$ et les 0,71 du rayon du tuyau ; c'est cette dernière proportion qui, vraisemblablement, se rapproche le plus de la vérité.

D'après M. Maurice Lévy, le filet animé de la vitesse moyenne est aux 0,689 du rayon, et l'on a entre la vitesse V_0 du filet central, la vitesse W à la paroi et la vitesse moyenne U, la relation :

$$U^2 = \frac{3V_0^2 + 4W^2}{7}$$

Lois et formules expérimentales du mouvement de l'eau dans les tuyaux. La résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau. — Nous concevons un liquide parfait comme une réunion de molécules indépendantes les unes des autres ; le frottement des parois s'exerce sur chaque molécule comme si elle était seule ; la résistance qui en résulte est donc proportionnelle au nombre des molécules en contact avec les parois, c'est-à-dire proportionnelle à la surface frottante, ou encore à la longueur du tuyau, car on ne considère que des tuyaux à diamètre constant.

Il est du reste facile, comme nous l'avons vu plus haut, de reconnaître que la résistance augmente avec la longueur du tuyau : prenez un tuyau alimenté par un réservoir invariable et débouchant toujours au même niveau dans l'atmosphère, quoique de longueur variable, vous verrez le débit diminuer à mesure que la longueur augmentera et les diminutions de charge, qui mesurent les augmentations de résistance, sont proportionnelles aux accroissements de longueur.

La résistance est indépendante de la pression. — Dubuat et les hydrauliciens qui lui ont succédé avaient posé ce principe que la résistance opposée par les parois des tuyaux au mouvement des liquides est indépendante de la pression que leur fait supporter le liquide en mouvement. Ce principe paraît au premier

abord assez difficile à admettre, parce qu'on est porté à assimiler le frottement des liquides au frottement des solides. Cependant, si l'on réfléchit que les liquides sont incompressibles et que dans les solides au contraire le frottement est produit par la compression, par la pénétration des corps en contact, on reconnaît en effet que l'indépendance des pressions et du frottement dans les liquides est parfaitement logique.

M. Darcy, dans ses expériences, a réalisé des pressions assez différentes entre elles et assez élevées pour qu'il fût possible de bien vérifier le principe de Dubuat.

Ainsi, il a fait varier de 17 à 26 mètres et de 22 à 40 mètres les pressions entre les deux parties des tuyaux soumises aux observations; néanmoins, les différences ou pertes de charges sont restées les mêmes pour les deux parties.

La même conséquence résulte d'une expérience directe dans laquelle les charges ont été portées de 18 à 41 mètres.

Ainsi, l'on peut admettre, sans erreur appréciable dans la pratique, que la résistance au mouvement de l'eau dans les tuyaux est indépendante de la pression.

En réalité, ce principe ne doit pas être vrai, car l'eau possède une certaine compressibilité; mais l'influence de la pression n'est sensible que pour des différences considérables dans les charges, différences qu'on ne réalise pas dans la pratique.

La résistance dépend de la nature des parois. — Longtemps on a considéré la résistance au mouvement des liquides dans les tuyaux comme indépendante de la nature des parois : on se disait que les parois, quelles qu'elles soient, sont recouvertes d'une mince pellicule immobile sur laquelle s'effectue le mouvement, de sorte que la paroi réelle n'agit pas. Les expériences de Darcy ont montré qu'il n'en était point ainsi, et que les rugosités des parois avaient sur l'écoulement une influence très-sensible, dont nous apprécierons plus loin la valeur.

La résistance dépend de la vitesse d'écoulement. — L'influence principale est due à la vitesse d'écoulement. C'est surtout la vitesse à la paroi qu'il faudrait considérer, mais nous ne connaissons pas la loi de décroissance des vitesses depuis le filet central jusqu'aux filets pariétaux. Il n'y a qu'une seule quantité que nous puissions apprécier exactement, c'est le quotient du débit par la section du tuyau; c'est ce qu'on appelle la vitesse moyenne.

Pour sortir d'embarras et pour établir une formule empirique, on a admis que la résistance était fonction, non pas de la vitesse centrale et de la vitesse à la paroi, mais uniquement de la vitesse moyenne.

Cette hypothèse est absolument fausse en théorie; néanmoins on la conserve dans la pratique, faute de mieux; elle conduit, du reste, à des formules empiriques qui concordent bien avec les résultats expérimentaux et qui rendent de précieux services.

En réalité, la résistance dépend de la vitesse de tous les filets liquides. On conçoit que la vitesse de chaque filet puisse être exprimée en fonction de la vitesse du filet central, de l'inclinaison du tuyau et de la distance qui sépare le filet considéré du filet central. De sorte que la résistance au mouvement serait exprimée par une fonction de la vitesse centrale, du rayon du tuyau et de sa pente.

Au lieu de cela, on considère seulement la vitesse moyenne et on cherche à relier par une formule empirique les variations de cette vitesse et les variations de la résistance.

Nomenclature des expériences sur l'écoulement dans les tuyaux. — De Prony, qui avait à sa disposition 51 expériences dues à Bossut, Couplet et Dubuat, calcula des tables pratiques qui furent longtemps en usage et qui le sont encore.

Mais elles doivent être abandonnées, malgré leur forme commode, parce qu'elles sont basées sur des expériences trop peu nombreuses et trop disparates.

L'ingénieur en chef d'Aubuisson, à qui l'on doit d'importants travaux hydrauliques, disait en 1829 : « Les formules de de Prony sont basées sur des expériences généralement faites avec de petits tuyaux, et elles se sont trouvées en défaut lorsqu'on les a appliquées aux grandes conduites. » Pour parer à cet inconvénient, d'Aubuisson rectifia les formules anciennes au moyen de quelques expériences nouvelles, mais les rectifications elles-mêmes ne reposaient point sur des bases indiscutables.

En présence de tant de résultats divers, n'était-il pas opportun d'entreprendre une série d'expériences nombreuses et variées, destinées à guider les constructeurs d'une manière certaine?

Darcy avait compris cette opportunité; ses fonctions lui permettaient de procéder à des expériences exactes, entreprises sur une grande échelle; nous en donnons plus loin une description sommaire.

FORMULE PRATIQUE FONDAMENTALE

La formule fondamentale du mouvement de l'eau dans les tuyaux est presque identique à celle du mouvement dans les canaux.

Désignons par : π la densité du liquide,
l la longueur du tuyau considéré,
ω et χ sa section et son périmètre,
d et r son diamètre et son rayon,
u la vitesse moyenne de l'eau qui le parcourt,
ζ la charge totale pour la longueur l, c'est-à-dire la différence de niveau entre le réservoir d'alimentation et l'extrémité de la conduite,

La résistance est proportionnelle à la surface des parois, c'est-à-dire au produit du périmètre χ par la longueur l; elle est proportionnelle en outre à une fonction inconnue de la vitesse moyenne, fonction que nous désignerons par $f(u)$.

Ainsi la résistance est exprimée par :

$$\chi.l.f(u)$$

D'un autre côté, le liquide, qui parcourt le tuyau, descend de la quantité ζ entre le sommet du réservoir et l'orifice extrême du tuyau; cette chute ou cette charge représente par unité de surface une pression π,ζ; sur la section entière du tuyau, c'est une force π,ζ,ω. Malgré l'existence de cette force, l'écoulement reste uniforme et ne s'accélère pas; la pression due à la charge est donc absorbée par la résistance. D'où résulte l'équation :

$$\pi.\zeta.\omega = \chi.l.f.(u)$$

Si l'on remarque que π est un nombre constant, et que le rapport $\frac{\omega}{\chi}$ est égal dans une section circulaire à $\frac{1}{4}d$, l'équation précédente peut se mettre sous la forme simple :

$$\frac{1}{4}d.j = \mathrm{F}(u),$$

dans laquelle j est égal au rapport $\left(\frac{\zeta}{l}\right)$; c'est la perte de charge par unité de longueur du tuyau.

Il n'y a plus qu'à déterminer la forme de la fonction F.

Formule de de Prony. C'est à ce moment qu'on entre dans le système empirique.

De Prony avait adopté pour F(u) la forme

$$au + bu^2$$

et il avait reconnu que toutes les expériences dont il disposait pouvaient être contenues dans l'expression :

$$\frac{1}{4}d.j = au + bu^2 \qquad (1)$$

pourvu qu'on donnât aux coefficients constants les valeurs :

$$\begin{cases} a = 0{,}0000\ 1733\ 14 \\ b = 0{,}0003\ 4825\ 90 \end{cases}$$

Ces valeurs montrent que, pour des vitesses de quelque importance, l'influence du carré de la vitesse est bien supérieure à l'influence du premier terme : on peut donc supprimer celui-ci dans les cas ordinaires de la pratique.

S'il s'agissait de tubes capillaires, le second terme au contraire disparaîtrait ; c'est ce qui arrive, comme nous le verrons plus loin, lorsqu'on veut calculer le mouvement d'un courant liquide à travers un terrain sableux.

Il faut remarquer encore que les coefficients sont donnés avec un bien trop grand luxe de décimales. A quoi bon une telle complication lorsqu'on est à peine sûr de l'exactitude des deux ou trois premiers chiffres ? Cela ne peut servir qu'à inspirer une sécurité trompeuse ; il est de beaucoup préférable de prendre les formules pour ce qu'elles sont, pour des formules approchées destinées à fournir au constructeur non pas des dimensions précises et déterminées, mais des limites entre lesquelles il doit se renfermer.

Eytelwein modifia les coefficients de de Prony en tenant compte de la perte de charge qui se produit par la contraction de la veine lorsque le liquide pénètre du réservoir dans le tuyau ; il obtint de la sorte les chiffres suivants :

$$\begin{cases} a = 0{,}0000\ 222 \\ b = 0{,}000\ 28 \end{cases}$$

Formule monôme. — La formule binôme se prête assez mal aux transformations algébriques et aux calculs logarithmiques.

Aussi plusieurs auteurs ont-ils cherché à établir une formule monôme.

Se servant des résultats expérimentaux connus, M. Dupuit trouva pour β le chiffre 0,0025, de sorte qu'il arriva définitivement à

$$\zeta = \left(\frac{q}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^5 \cdot l \qquad (2)$$

Cette formule a été mise en tables qui donnent immédiatement les valeurs de $\left(\frac{q}{20}\right)^2$ et de $\left(\frac{1}{d}\right)^5$.

Les tables de Dupuit sont commodes et ont reçu des praticiens un accueil favorable.

Cependant on peut leur reprocher d'adopter pour le coefficient de la résistance un nombre constant, alors que les expériences de Darcy ont montré que ce coefficient devait varier avec le diamètre des tuyaux. Nous conseillons donc de préférence l'usage des tables que nous avons dressées d'après les expériences de Darcy et qu'on trouvera à la fin de ce volume.

Formule monôme de Darcy. — M. Darcy a rapporté dans vingt-deux tableaux les résultats des cent quatre-vingt dix-huit expériences qu'il a exécutées pour déterminer :

1° Les relations existant entre les pentes, les vitesses moyennes et les diamètres des conduites;

2° Les pertes de charge nécessaires à la production des vitesses moyennes.

Il a montré que, contrairement à l'opinion précédemment admise, la nature et l'état des surfaces exercent une influence notable sur les produits des conduites.

En effet, les conduites en fer enduites de bitume donnent des produits plus considérables que ceux que l'on déduisait des formules de de Prony dans le rapport de 4 à 3 environ; le verre offre des résultats analogues ; mais, en revanche, dans des conduites en fonte dont des dépôts, même légers, n'avaient diminué le diamètre que d'une faible quantité, la vitesse et, par suite, la dépense, se sont trouvées notablement inférieures à ce qu'indiquaient les formules de de Prony, tandis qu'après le nettoyage il y avait accord entre ces formules et l'expérience.

Quant au diamètre, M. Darcy a reconnu que les formules de de Prony ne lui assignaient pas une assez grande influence ; pour les petits diamètres, les débits expérimentaux sont inférieurs à ceux de ces formules, tandis que pour les grands diamètres ils leur sont supérieurs.

En ce qui touche les conduites en plomb de 14, 27 et 41 millimètres de diamètre, les formules anciennes sont d'accord avec les expériences nouvelles.

Suivant M. Darcy, si cette influence des diamètres avait paru à de Prony moins considérable qu'elle ne l'est réellement, cela tient à une sorte de compensation fortuite qui se sera établie entre la résistance des tuyaux de petit diamètre, mais bien polis, et celle des tuyaux de grand diamètre, mais souillés par des dépôts. M. Darcy a eu soin de comparer entre eux des tuyaux ayant leurs parois dans le même état.

Pour les petites vitesses, inférieures à $0^m,10$ par seconde, M. Darcy a montré que le terme relatif au carré de la vitesse dans les formules de résistance paraît avoir si peu d'influence que la résistance devient sensiblement proportionnelle à la simple vitesse.

Ayant traduit graphiquement par des courbes les résultats de ses expériences, M. Darcy a reconnu les faits suivants :

M. Barré de Saint-Venant, se servant des mêmes expériences que de Prony, a donné l'expression

$$\frac{1}{4}d.j=\alpha.u^{\beta}$$

dont les coefficients constants, α et β ont les valeurs suivantes :

$$\begin{cases}\alpha=0{,}000\ 295\\ \beta=\dfrac{12}{7}\end{cases}$$

Cette expression n'a point passé dans le domaine pratique.

Formule monôme de Dupuit. — « La formule monôme, dit Dupuit, ne peut donner des résultats sensiblement différents de ceux de la formule binôme que pour les très-petites vitesses ; or, les erreurs que l'on peut commettre alors n'ont pas d'importance parce que le résultat obtenu, étant lui-même très-petit, n'est pas de nature à avoir de l'influence sur le parti à prendre. Que cherche-t-on en effet? Ou un diamètre suffisant pour débiter un produit donné, avec une certaine charge, ou le produit que peut fournir un diamètre donné ou quelle charge est nécessaire, etc. Or, dans toutes ces questions, la vitesse ne saurait être très-petite, ou si elle l'était dans quelque partie du système de conduites, cette partie serait comme étrangère au résultat par rapport au reste. C'est ce qu'on reconnaîtra dès qu'on aura fait quelques applications des formules à un certain nombre de questions pratiques, et ce que nous ferons peut-être comprendre dès à présent en disant qu'il en est de ces formules comme de celles qui sont relatives à la résistance des matériaux ; leur exactitude n'est nécessaire que dans les flexions et les charges considérables ; peu importe au constructeur qu'une pièce de pont fléchisse d'une fraction plus ou moins grande de millimètre sous le pas d'un piéton ; ce qu'il a besoin de savoir, c'est la déformation qu'elle subira sous la charge de la plus lourde voiture, c'est enfin la charge qui en occasionnera la rupture ; de même, dans les distributions d'eau, ce qu'on cherche, c'est le maximum de débit, de perte de charge, qui n'arrivent que dans les grandes vitesses.

On ne doit donc pas hésiter à se servir de la formule monôme d'une manière exclusive dans la pratique, d'autant plus que la formule binôme n'est elle-même qu'une approximation, puisqu'elle suppose que tous les filets ont la même vitesse et que le frottement est indépendant de la nature de la paroi.

D'après ces considérations, M. Dupuit adopte la formule

$$d.j=\alpha.u^2,$$

qui, en remplaçant u par sa valeur $\dfrac{q}{\left(\dfrac{\pi d^2}{4}\right)}$, et la perte de charge j par son expression $\left(\dfrac{\zeta}{l}\right)$, peut s'écrire

$$\zeta=\beta\frac{lq^2}{d^5};$$

la quantité ζ est la hauteur totale dont l'eau descend depuis le niveau du réservoir jusqu'à l'orifice de la conduite.

1° La formule

$$\frac{1}{4}d.j = au + bu^2$$

exprime pour chaque tuyau la loi de la résistance, excepté pour les tuyaux de très-petit diamètre et pour les faibles vitesses ; alors, comme nous venons de le dire, la résistance est sensiblement proportionnelle à la simple vitesse.

2° En passant d'un diamètre à un autre pour une même nature de tuyaux, ou d'une espèce de tuyau à une autre, les valeurs des coefficients a et b des deux puissances de la vitesse ne restent pas les mêmes ; elles varient avec les surfaces lorsque ces dernières offrent des degrés de poli inégaux, et avec les rayons lorsque les surfaces sont au contraire à peu près identiques.

3° Pour des tuyaux recouverts de dépôts, comme cela arrive aux conduites qui servent depuis un certain temps, la résistance peut être considérée comme simplement proportionnelle au carré de la vitesse, ce qui simplifie l'expression et le calcul dans les applications.

Lorsqu'on se propose d'établir une canalisation, ce ne sont pas des tuyaux neufs à surface polie qu'il faut considérer dans les calculs, mais des tuyaux ayant déjà quelque temps de service, c'est-à-dire recouverts d'un dépôt plus ou moins épais.

Dans les applications, la formule monôme

$$\frac{1}{4}d.j = \beta.u^2$$

doit donc seule être appliquée.

Si l'on remplace le diamètre d par deux fois le rayon r et qu'on chasse la fraction $\frac{1}{2}$ du premier membre pour la faire entrer dans le coefficient constant du second membre, la formule pratique arrive à sa forme définitive

$$r.j = b_1 u^2. \tag{5}$$

Le tableau suivant renferme les valeurs de b_1, de $\left(\frac{b_1}{r}\right)$ et de $\left(\sqrt{\frac{r}{b_1}}\right)$ pour les tuyaux dont le diamètre est compris entre $0^m,01$ et 1 mètre ; il résume les expériences de Darcy sur les tuyaux en fonte neuve.

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE RÉSISTANCE DES TUYAUX NEUFS EN FONTE

NOMBRES b_1 DE LA FORMULE $rj = b_1 u^2$

DIAMÈTRES	RAYONS	COEFFICIENT b_1	VALEUR DE $\frac{b_1}{r}$	VALEUR DE $\sqrt{\frac{r}{b_1}}$
0,01	0,005	0,001801	0,36020	1,666
0,02	0,01	0,001154	0,11540	2,945
0,027	0,0135	0,000986	0,073056	3,699
0,03	0,015	0,000938	0,062555	3,998
0,04	0,02	0,000850	0,041525	4,907
0,05	0,025	0,000763	0,030652	5,715
0,054	0,027	0,000746	0,027635	6,013
0,06	0,03	0,000722	0,024089	6,445
0,07	0,035	0,000691	0,019767	7,112
0,08	0,04	0,000668	0,016718	7,733
0,081	0,0405	0,000666	0,016463	7,793
0,09	0,045	0,000650	0,014461	8,315
0,10	0,05	0,000636	0,012728	8,865
0,108	0,054	0,000626	0,011607	9,231
0,11	0,055	0,000624	0,011337	9,383
0,12	0,06	0,000614	0,010247	9,878
0,13	0,065	0,000606	0,009331	10,352
0,135	0,067	0,000602	0,008931	10,581
0,14	0,07	0,000599	0,008563	10,806
0,15	0,075	0,000593	0,007910	11,243
0,16	0,08	0,000587	0,007348	11,665
0,162	0,081	0,000586	0,007245	11,748
0,17	0,085	0,000583	0,006860	12,073
0,18	0,09	0,000578	0,006432	12,468
0,19	0,095	0,000575	0,006055	12,705
0,20	0,10	0,000571	0,005717	13,225
0,21	0,105	0,000568	0,005415	13,588
0,216	0,108	0,000566	0,005249	13,802
0,22	0,11	0,000565	0,005145	13,943
0,23	0,115	0,000563	0,004897	14,288
0,24	0,12	0,000560	0,004674	14,626
0,25	0,125	0,000558	0,004470	14,956
0,26	0,13	0,000556	0,004282	15,280
0,27	0,135	0,000554	0,004110	15,597
0,28	0,14	0,000553	0,003951	15,908
0,29	0,145	0,000551	0,003804	16,213
0,30	0,15	0,000550	0,003667	16,512
0,31	0,155	0,000548	0,003540	16,806
0,32	0,16	0,000547	0,003421	17,095
0,325	0,1625	0,000546	0,003365	17,238
0,33	0,165	0,000546	0,003310	17,380
0,34	0,17	0,000545	0,003206	17,660
0,35	0,175	0,000543	0,003108	17,936
0,36	0,18	0,000542	0,003016	18,207
0,37	0,185	0,000541	0,002929	18,475
0,38	0,19	0,000541	0,002847	18,739
0,39	0,195	0,000540	0,002770	18,999
0,40	0,20	0,000539	0,002696	19,256
0,41	0,205	0,000538	0,002627	19,510
0,42	0,21	0,000537	0,002561	19,760
0,43	0,215	0,000537	0,002498	20,007
0,44	0,22	0,000536	0,002438	20,251
0,45	0,225	0,000535	0,002381	20,493
0,46	0,25	0,000535	0,002326	20,731
0,47	0,235	0,000534	0,002274	20,967
0,48	0,24	0,000533	0,002224	21,200
0,49	0,245	0,000533	0,002177	21,431
0,50	0,25	0,000532	0,002131	21,659
0,55	0,275	0,000530	0,001929	22,767
0,60	0,30	0,000528	0,001761	23,823
0,65	0,325	0,000526	0,001621	24,835
0,70	0,35	0,000525	0,001501	25,807
0,75	0,375	0,000524	0,001398	26,745
0,80	0,40	0,000523	0,001307	27,650
0,85	0,425	0,000522	0,001228	28,527
0,90	0,45	0,000521	0,001158	29,378
0,95	0,475	0,000520	0,001096	30,205
1,00	0,50	0,000519	0,001039	31,010

Ce tableau ne doit pas être employé dans la pratique, puisqu'il s'applique aux tuyaux neufs, ou du moins il ne peut l'être qu'avec les restrictions suivantes :

1° Lorsqu'on cherche la pente correspondant à une vitesse déterminée, on doit doubler cette pente dans la pratique, ou si la pente est donnée, il importe de la diviser par 2 et de ne compter que sur la vitesse correspondant au quotient de cette division. Cela revient à doubler la valeur du coefficient b_1; en effet, la résistance d'un tuyau recouvert d'un dépôt est double de celle que présente un tuyau neuf en fonte de même diamètre. Il va sans dire que, lorsque le dépôt est formé, la nature des parois perd à peu près son influence, de sorte que, quelle que soit la matière des tuyaux, on peut adopter pour la valeur de leur coefficient de résistance b_1 des nombres égaux au double de ceux qui sont inscrits au tableau précédent.

2° Indépendamment du retard provenant des aspérités de la paroi, il existe une autre cause qui affaiblit le volume de l'écoulement : c'est l'épaisseur de la couche déposée, qui réduit le diamètre de la section libre. Pour y remédier, il importe, suivant la nature des eaux à distribuer, d'augmenter les diamètres trouvés d'une certaine quantité d'autant plus nécessaire à ajouter que ces diamètres sont plus faibles.

La formule $rj = b_1 u^2$ ne s'applique qu'à des vitesses supérieures à $0^m,10$ par seconde, et le coefficient b_1 est variable avec le rayon r du tuyau, de sorte qu'on peut exprimer ce coefficient par la formule

$$b_1 = \alpha + \frac{\beta}{r}$$

Pour le fer étiré et la fonte lisse, les deux coefficients du second membre ont les valeurs

$$\begin{cases} \alpha = 0{,}000\ 507 \\ \beta = 0{,}000\ 0065 \end{cases}$$

Ces valeurs doivent être doublées quand la surface métallique a été recouverte d'un dépôt après quelque temps d'usage.

Enfin, pour réunir tous les cas, même ceux des faibles vitesses, dans une formule unique, Darcy a donné l'expression générale

$$rj = \left(\alpha + \frac{\alpha_1}{r^2}\right) u + \left(\beta + \frac{\beta_1}{r}\right) u^2$$

et dans le cas des parois métalliques neuves et lisses, les quatre coefficients prennent les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha = 0{,}000\ 034 \\ \alpha_1 = 0{,}000\ 000\ 007\ 52 \end{cases} \qquad \begin{cases} \beta = 0{,}000\ 1286 \\ \beta_1 = 0{,}000\ 0129 \end{cases}$$

Nous ne donnons ces nombres qu'à cause de l'intérêt théorique qu'ils peuvent offrir ; on n'aura guère l'occasion de s'en servir dans la pratique.

RELATION ENTRE LE RAYON r DE LA CONDUITE, LA CHARGE j PAR MÈTRE COURANT, LE DÉBIT q ET LA VITESSE MOYENNE u

Les problèmes relatifs au mouvement de l'eau dans les tuyaux portent sur quatre variables :

Le rayon r de la conduite, exprimé en mètres.
La charge j par mètre courant, exprimée en mètres.
Le débit q à la seconde, exprimé en mètres cubes,
La vitesse moyenne u exprimée en mètres.

Nous avons entre ces quatre quantités une première relation :

$$r.j = b_1 u^2 \tag{3}$$

et nous savons en outre que le débit est le produit de la section par la vitesse moyenne, ce qui nous donne une seconde relation :

$$\pi.r^2.u = q \tag{4}$$

Ainsi, les quatre quantités variables sont liées par deux relations, de sorte que, deux de ces quantités étant données, on pourra déterminer les deux autres, ce qui donne lieu à autant de problèmes différents qu'il y a de combinaisons de quatre quantités deux à deux.

Nous savons que ce nombre de combinaisons est six. Donc, il y a six problèmes à résoudre, que l'on peut résumer au tableau synoptique ci-après :

		DONNÉES.	INCONNUES.
1er	*Problème.*	$r.j$	$q.u$
2e	—	$r.q$	$j.u$
3e	—	$r.u$	$j.q$
4e	—	$j.q$	$r.u$
5e	—	$j.u$	$r.q$
6e	—	$q.u$	$r.j$

Voici les énoncés de ces six problèmes :

1° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la charge par mètre courant, déterminer la vitesse et la dépense ;

2° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que le débit qu'elle doit fournir, calculer la vitesse et la charge par mètre courant ;

3° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la vitesse moyenne du liquide qui la parcourt, calculer le débit et la charge par mètre courant ;

4° Connaissant la charge disponible par mètre courant et le débit qu'on veut obtenir, calculer le rayon que devra avoir cette conduite et la vitesse de l'eau qui devra la parcourir ;

5° Connaissant la charge disponible et la vitesse moyenne, déterminer le rayon et le débit ;

6° Connaissant le débit et la vitesse moyenne qu'on veut obtenir, déterminer le rayon et la charge par mètre courant.

1er Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la charge par mètre courant, déterminer la vitesse et la dépense.*

Les tables de Darcy permettent de déterminer le coefficient b_1 puisque l'on connaît le rayon de la conduite ; il n'y a donc d'inconnue dans la formule (3) que la vitesse moyenne u qu'il est facile d'en déduire.

Connaissant la vitesse moyenne, le débit s'obtient immédiatement par l'équation (4).

Généralement, on n'a pas besoin de faire tous les calculs et on prend dans les tables les résultats cherchés. On trouvera ces tables avec des exemples à la fin du présent traité.

2e Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite et le débit qu'elle doit fournir, on demande quelles doivent être la vitesse et la charge par mètre courant.*

L'équation (3) renferme les deux inconnues j et u; il faut en éliminer une, ce qu'on fait en tirant de l'équation (4) la valeur de u qu'on reporte dans l'équation (3). Il en résulte :

$$j = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5} \tag{5}$$

On connaît le coefficient b_1 puisqu'il dépend seulement du rayon r et qu'il est fourni par les tables ; donc, on peut calculer la charge j par mètre courant. L'usage des tables rendra ce calcul assez simple.

Quant à la vitesse moyenne u, elle est fournie par l'équation (4) dont elle est la seule inconnue.

Du reste la connaissance de la vitesse moyenne est généralement peu intéressrnte lorsqu'on a déjà le débit ; le débit est l'inconnue principale.

L'équation (5) nous apprend que, le rayon r restant constant, la charge augmente comme le carré du débit, de sorte que pour obtenir un débit double il faut quadrupler la charge. C'est donc plutôt à une augmentation du diamètre de la conduite qu'à une augmentation de la charge qu'il faut demander un accroissement de débit. Cela se conçoit si on remarque que la résistance au mouvement croît comme le carré de la vitesse, tandis que la force motrice due a la pesanteur varie proportionnellement à la charge.

3e Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite et la vitesse d'écoulement, déterminer le débit et la charge par mètre courant.*

Les équations (3) et (4) renferment chacune une seule inconnue : la première, la charge j et la seconde le débit q. Le problème est donc immédiatement résolu :

$$j = \frac{b_1 u^2}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5}$$

et

$$q = \pi r^2 u.$$

Les tables donnent immédiatement la solution du problème qui, du reste, est sans intérêt pratique.

4e Problème. *Connaissant la charge disponible et le débit à obtenir, on demande le rayon et la vitesse de la conduite.*

Éliminant u entre les équations (3) et (4) on trouve :

$$r^5 = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 . j} \tag{6}$$

et cette équation donnerait la valeur de r au moyen des logarithmes si l'on avait la valeur numérique de b_1. Mais, d'après les formules de Darcy, b_1 dépend de r, de sorte qu'en remplaçant b_1 par sa valeur on aurait une équation complète du 5e degré en r, difficile à résoudre.

Voici comment on peut opérer pour arriver rapidement au résultat : la valeur moyenne de b_1 pour les tuyaux neufs est de 0,000625 ou $(0,025)^2$; dans une première approximation, on donnera à b_1 cette valeur moyenne et on en déduira la valeur correspondante de r. Celle-ci connue, les tables de Darcy fourniront une valeur approchée de b_1 qui donnera à son tour une valeur plus approchée du rayon. Généralement, il sera inutile d'aller plus loin et l'approximation sera suffisante.

On arrive encore à la solution du problème au moyen des tables à double entrée, analogues à celle qu'avait dressée M. Mary en prenant pour bases les expériences de de Prony.

5e Problème. *Connaissant la charge disponible et la vitesse moyenne, déterminer le rayon et le débit de la conduite.*

Les équations (3) et (4) ne renferment chacune qu'une inconnue dont elles donnent immédiatement la valeur. Cependant, comme b_1 dépend de r, il faut, pour déterminer le rayon, procéder par approximations successives, comme nous l'avons fait plus haut.

6e Problème. *Connaissant le débit et la vitesse moyenne qu'on veut obtenir, on demande la charge et le rayon de la conduite.*

Les équations (3) et (4) résolues par rapport à j conduisent à :

$$j^2 = \frac{\pi b_1^2 u^5}{q} \tag{7}$$

Quant au rayon (r) il résulte de l'équation :

$$r^2 = \frac{q}{\pi u}$$

c'est lui qu'on déterminera tout d'abord. La connaissance du rayon entraîne celle du coefficient b_1 ; il ne reste plus à déterminer que la charge qui s'obtient par la formule (7).

Remarque. Des six problèmes que nous venons de résoudre, il n'y en a que deux d'importants et qui se rencontrent dans la pratique; c'est le premier et le quatrième.

La solution numérique en est facile, grâce aux tables que nous donnons à la fin de ce traité.

En ce qui touche les quatre autres problèmes, ils ne se présentent pour ainsi dire jamais ; on en calculera directement les résultats par les formules précédentes, ou bien on aura recours aux tables lorsque l'usage en sera possible.

Résolution du premier et du quatrième problèmes dans le cas d'une conduite cylindrique faisant communiquer deux réservoirs. — Soit deux réservoirs, dont les niveaux invariables sont à une hauteur h l'un de l'autre ; on les réunit par une conduite ab, l'écoulement s'établit du réservoir le plus élevé vers le plus bas, et on se propose de déterminer :

1° le rayon de la conduite qui débitera un volume donné ;

2° Ou bien le volume que débitera une conduite de rayon donné. Ces deux

problèmes correspondent au premier et au quatrième des problèmes généraux que nous venons de passer en revue.

Nous admettons que les deux réservoirs débouchent librement dans l'atmo-

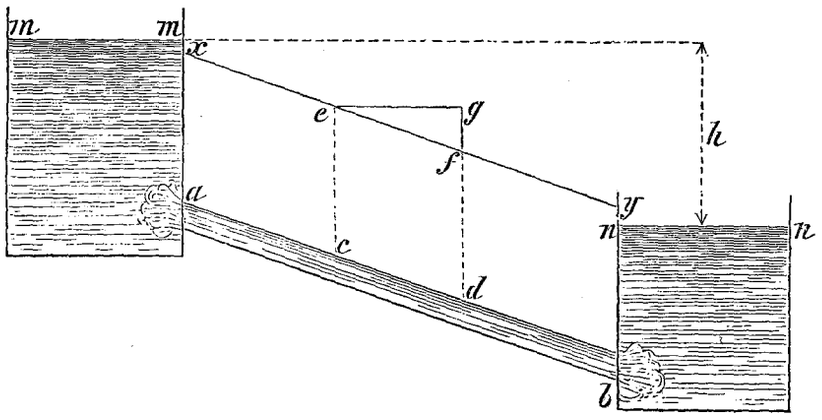

Fig. 1.

sphère; si par hasard il n'en était pas ainsi, que la pression fût égale à p sur le réservoir m et à p' sur le réservoir n, il faudrait remplacer la différence h des niveaux piézométriques par

$$\left(h+\frac{p-p'}{\pi}\right)$$

expression dans laquelle π représente la densité du liquide.

La différence des niveaux piézométriques en m et n est donc égale à h; comme les réservoirs sont d'une section très-grande comparée à celle de la conduite, il n'y a point de vitesse sensible dans les parties hautes de ces réservoirs, et l'eau part d'une vitesse nulle en m pour arriver à une vitesse nulle en n.

Tout le travail produit par la pesanteur est donc absorbé par les contractions, les frottements et les tourbillons.

Ce travail est représenté par la charge h; il faut donc que toutes les pertes de charge cumulées de m en n donnent un total égal à h.

Ces pertes de charge comprennent :

1° La perte de charge due à la contraction de la veine, à l'entrée a de la conduite: cette entrée se fait par un ajutage cylindrique dont nous avons donné la théorie à la page 44 de notre traité d'hydraulique; nous avons vu que la charge au-dessus de l'orifice a était absorbée pour $\frac{2}{3}$ par la vitesse u d'écoulement à l'extrémité de l'ajutage et pour un tiers par la contraction de la veine à l'entrée de l'ajutage. Il en résulte que la perte de charge, produite par cette contraction, est la moitié de la hauteur $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$ due à la vitesse du liquide à l'extrémité de l'ajutage. Ainsi, nous constatons à l'entrée de la conduite une perte de charge égale à $\left(\frac{1}{2}\frac{u^2}{2g}\right)$;

2° La perte de charge due au frottement du liquide sur les parois du tuyau ab dont la longueur est l; cette perte j par mètre courant est égale à $\left(\frac{b_1u^2}{r}\right)$ et pour la longueur l, elle devient : $\left(\frac{lb_1u^2}{r}\right)$;

3° La perte de charge due à la destruction de la vitesse u au-delà de l'extrémité b de la conduite. Cette vitesse s'évanouit en remous et tourbillons ; la perte de charge est donc totale et représentée par $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$.

De la sorte, nous arrivons à l'équation :

$$h = \frac{3}{2}\frac{u^2}{2g} + \frac{lb_1u^2}{r};$$

qui peut s'écrire :

$$\frac{rh}{l} = b_1u^2\left(1 + \frac{3}{2}\frac{r}{b_1l.2g}\right)$$

1° Si c'est le débit qui est donné et qu'on veuille calculer le rayon r, on remplace u par $\left(\frac{q}{\pi r^2}\right)$ et on a l'équation :

$$(a) \qquad r^3 = \frac{l}{h}.b_1\frac{q^2}{\pi^2}\left(1 + \frac{3}{2}\frac{r}{2g.b_1l}\right)$$

Il faudrait d'abord déterminer b_1, qui dépend de r ; on opère comme nous l'avons déjà fait, on remplace b_1 par sa valeur moyenne 0,000625 (tuyaux neufs), et, dans une première application, on néglige le second terme de la parenthèse du second membre, ce second terme est toujours très-petit relativement à l'unité. On détermine ainsi une valeur approchée de r ; elle permet de trouver dans les tables la valeur approximative de b_1 ; on recommence alors les calculs avec cette nouvelle valeur de b_1 et, en substituant à r dans la parenthèse du second membre sa valeur approchée, on arrive à trouver pour le rayon un nombre dont on peut se contenter. Il serait, du reste, facile de pousser l'approximation plus loin.

Exemple numérique. *Deux réservoirs, présentant une différence de niveau de 10 mètres, sont réunis par une conduite d'un kilomètre de long. Quel devra être le rayon de cette conduite pour qu'elle débite* $0^{mc},5$ *à la seconde?*

$$l = 1000 \quad h = 10 \quad q = 0,5$$

Lorsque la conduite aura servi quelque temps, la résistance de ses parois doublera, à cause des dépôts qui les recouvriront, et le coefficient moyen b_1 deviendra égal à deux fois

$$0,000625 \text{ soit à } 0,00125$$

Première approximation :

$$r^5 = 100.0,00125.\frac{\overline{0,5^2}}{\overline{3,14^2}} \qquad r = 0,32$$

Deuxième approximation :

La table de Darcy donne pour $r = 0,32\ldots$ $b_1 = 0,000526$ pour les tuyaux neufs, et, par suite, 0,00105 pour les tuyaux depuis longtemps en service.

$$r^5 = 100.0,00105.\frac{\overline{0,5^2}}{\overline{3,14^2}}(1,023) \qquad r = 0^m,31$$

Il est inutile de pousser plus loin l'approximation.

2° Si l'on donne le diamètre de la conduite et qu'on demande le débit, il n'y aura qu'à résoudre l'équation (*a*) par rapport à q : elle donne :

$$(b) \qquad q^2 = \frac{\pi^2 h . r^5}{l b_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{r}{2g . b_1 . l}}$$

Exemple numérique. *Quel sera le débit d'une conduite de* $0^m,31$ *de rayon, de* 1000 *mètres de longueur, réunissant deux réservoirs dont les niveaux sont à* 40 *mètres de hauteur l'un par rapport à l'autre ?*

$$r = 0^m,31 \quad h = 40 \quad l = 1000$$

D'après les tables de Darcy, $b_1 = 0,000528$ pour les tuyaux neufs, ce qui fait, pour des tuyaux en service :

$$b_1 = 0,00105$$

Portant ces données dans l'équation (*b*), il vient :

$$q^2 = 1,004 \quad \text{et} \quad q = 1.$$

Le débit est donc d'un mètre cube ; en effet, nous avons quadruplé la charge dont nous disposions dans l'exemple précédent, par suite le débit, qui varie proportionnellement à la racine carrée de la charge, a dû doubler.

Construction de la ligne de charge. — Si nous nous reportons à la figure 1, il est facile de suivre la ligne de charge depuis le réservoir m jusqu'au réservoir n, c'est-à-dire de reconnaître quelle est en chaque point la hauteur de la colonne piézométrique.

Nous faisons abstraction de la pression atmosphérique qui s'exerce également des deux côtés ; au moment où le liquide pénètre dans la conduite en a, la charge est marquée par la profondeur de l'orifice a au-dessous du niveau m du réservoir, le niveau piézométrique est en m.

Par suite de la contraction de la veine liquide, il y a une perte de charge égale à $\left(\frac{1}{2}\frac{u^2}{2g}\right)$; si nous prenons une hauteur mx égale à cette quantité, la ligne de charge tombera rapidement de m en x.

De même, à l'extrémité de la conduite, il reste la charge qui correspond à la vitesse u ; cette charge, représentée par la hauteur $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, disparaît en tourbillons ; si nous prenons la hauteur ny égale à $\frac{u^2}{2g}$, et que nous traçions la droite xy, cette droite représentera la ligne de charge sur tout le parcours de la conduite, entre les deux réservoirs.

La pression en un point c de la conduite est donc représentée par la colonne d'eau ce ; la pression au point d est représentée par la colonne df. La verticale fg représente la chute de c en d, c'est-à-dire la charge absorbée pour entretenir le mouvement uniforme du liquide sur la portion cd du tuyau.

Si l'on adapte aux points c et d de la conduite deux tuyaux flexibles assez longs pour qu'on en puisse accoler les parties supérieures sur une planche verti-

cale, l'eau s'élèvera dans ces tuyaux flexibles aux niveaux représentés par les points c et f; on verra immédiatement la différence de ces deux niveaux, et, si la planche verticale porte une graduation, on connaîtra immédiatement la hauteur fg, c'est-à-dire la perte de charge correspondant à la longueur cd de la conduite.

L'appareil que nous venons de décrire porte le nom de piézomètre différentiel; nous verrons tout à l'heure l'usage qu'en a fait Darcy dans ses expériences sur l'écoulement de l'eau dans les conduites.

Généralement, on ne tient pas compte des pertes de charge produites par la contraction du liquide à l'entrée de la conduite et par la destruction de la vitesse à la sortie, pertes de charge que nous avons représentées par les verticales mx et ny; en effet, elles sont insensibles par rapport aux pertes de charge dues aux frottements dès que la longueur de la conduite est notable.

Cherchons-en la valeur pour le premier exemple numérique donné plus haut :

La vitesse u est le quotient du débit $q = 0{,}5$ par la section $\pi . \overline{0{,}31}^2 = 0{,}302$; elle est donc égale à $\left(\frac{5}{3}\right)$ et sa hauteur représentative est de $0^m{,}14$.

Ainsi, la hauteur mx serait égale à $0^m{,}07$ et la hauteur ny à $0^m{,}14$. Dans nombre de cas de la pratique, ces hauteurs seront encore moindres.

Elles sont donc négligeables en présence de la perte de charge totale, et on peut supposer celle-ci répartie uniformément sur toute la longueur de la conduite, ce qui revient à remplacer la ligne de charge réelle $mxyn$ par la droite mn.

DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES DE DARCY

Les raisonnements et les calculs du paragraphe précédent vont nous permettre de comprendre facilement la disposition adoptée par Darcy pour ses expériences.

Elles ont été exécutées dans les dépendances des réservoirs de Chaillot, alimentés par de l'eau de Seine qu'y envoient les puissantes machines de Cornouailles décrites dans notre *Traité des machines à vapeur*.

Grâce à ces réservoirs élevés on disposait à la fois de grands volumes d'eau et de fortes charges; les appareils d'expérimentation proprement dits (fig. 2), se trouvaient dans les parties basses, près des berges de la Seine.

L'eau des réservoirs arrivait dans un cylindre couché a par une conduite de gros diamètre, dont on faisait varier à la fois la charge et le débit au moyen d'un robinet étranglant plus ou moins le passage.

Le cylindre a jouait le rôle de réservoir d'alimentation pour la conduite à expérimenter, il était rempli d'un liquide animé d'une faible vitesse et possédant une charge plus ou moins forte, suivant la hauteur du réservoir supérieur avec lequel il communiquait et suivant l'étranglement produit par le robinet.

Le cylindre a était destiné à amortir la vitesse de l'eau avant son entrée dans les conduites; à l'intérieur était placé un diaphragme formé d'une plaque de tôle percée de trous; à l'avant, il se terminait par une plaque verticale en fonte, dans laquelle on pratiquait des orifices circulaires destinés à recevoir l'origine

des conduites à expérimenter. A sa partie la plus haute, le cylindre portait un robinet pour l'évacuation de l'air.

Il portait en outre un robinet 5, sur lequel se vissait un tube flexible ou piézomètre ; le niveau auquel l'eau s'élevait dans ce tube mesurait la pression.

Un peu après l'origine m de la conduite, on trouvait un second robinet à piézomètre 4 ; la différence des piézomètres 5 et 4 donnait la perte de charge due à la contraction de la veine à son entrée dans la conduite.

A environ 5 mètres plus loin, on trouvait le piézomètre 3, servant à mesurer la charge au point où le mouvement commençait réellement à devenir uniforme. A 50 mètres plus loin, se trouvaient le robinet et le piézomètre n° 2.

Enfin à 50 mètres au-delà se trouvaient le robinet et le piézomètre n° 1. La différence de niveau entre les piézomètres 3 et 1 donnait la perte de charge produite par les frottements dans la conduite sur une longueur de 100 mètres.

Au-delà du piézomètre 1, la conduite se prolongeait pendant quelques mètres et portait un robinet vanne v : elle débouchait dans une cuve b, d'où l'eau s'épanchait par une échancrure ou déversoir dans des bassins de jauge d ; le niveau de l'eau dans la cuve b était donné par un tube indicateur en verre accolé à cette cuve.

Les conduites étaient posées sur des dés en pierre bien solides, avec une légère pente dirigée en sens inverse du mouvement, afin de permettre une facile émission de l'air lors de la mise en charge.

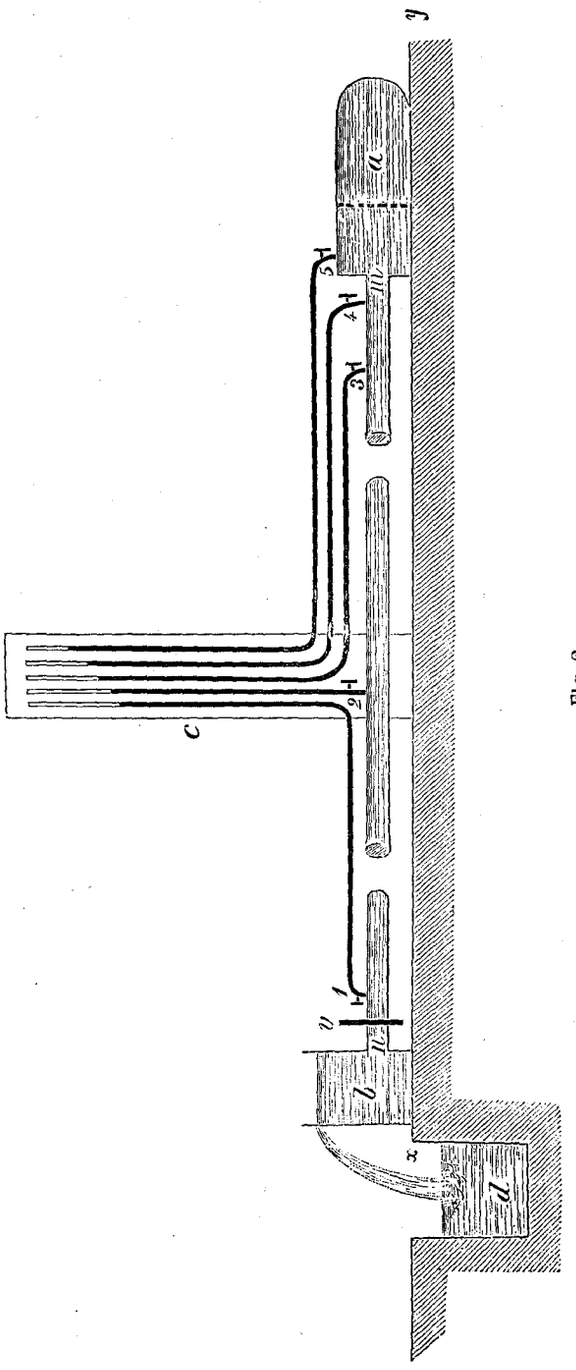

Fig. 2.

Les tuyaux piézométriques étaient réunis le long d'une planche verticale c, placée à peu près au milieu de la longueur de la conduite.

Tant que la charge restait inférieure à 6 mètres, les piézomètres étaient à colonnes d'eau ; pour des charges supérieures, on se servait de véritables manomètres à mercure débouchant à l'air libre.

A la planche verticale était jointe une échelle en fer permettant à un observateur de suivre facilement et constamment les variations des niveaux piézométriques.

Les expériences ont toujours été faites sur 100 mètres de longueur, sauf pour une conduite en verre et pour les conduites en plomb.

La perte de charge dans la conduite, sur une longueur de 100 mètres, était donnée par la différence des hauteurs des piézomètres 1 et 3. A première vue, dit M. Darcy, le piézomètre 2 du milieu ne semblerait pas nécessaire, mais il a rendu de grands services pendant les expériences en accusant des perturbations qui auraient vicié les expériences et dont on ne se serait pas aperçu si on n'avait pas eu ce piézomètre supplémentaire. En effet, pour être certain que tout fonctionnait convenablement, il fallait que les différences entre le premier et le deuxième ainsi qu'entre le deuxième et le troisième manomètres fussent à peu près égales. Je dis à peu près, parce que quelque variation dans le diamètre moyen de la conduite, en amont ou en aval, pouvait occasionner une légère différence, mais dans ce cas, la différence devait toujours se produire dans le même sens pour toutes les charges. Lorsque ces conditions n'étaient pas remplies, on était obligé, ou de réparer les fuites, ou de faire différentes manœuvres pour purger d'air la conduite.

Pour les conduites en plomb, les manomètres furent placés à 25 mètres l'un de l'autre ; on opérait donc sur une longueur de 50 mètres seulement ; la seule conduite en verre mise en expérience avait 44 mètres de long.

Les joints des conduites avaient été faits avec le plus grand soin, de manière à ne présenter aucune saillie à l'intérieur : toute fuite et tout suintement étaient immédiatement réparés avant l'expérience.

Il était très-difficile, au commencement d'une série d'expériences, d'arriver à chasser l'air des tubes des piézomètres : on était forcé de laisser couler l'eau pendant longtemps à pleine charge et on reconnaissait que toute irrégularité avait disparu lorsque les différences étaient égales entre les piézomètres 1 et 2, 2 et 3.

Le diamètre moyen de la conduite mise en expérience se déduisait du volume d'eau qu'il fallait pour la remplir sur sa longueur entière.

Les expériences ont porté sur 22 tuyaux différents, savoir :

3	tuyaux en	fer étiré	d'un diamètre compris entre	12 et 39 millimètres.
3	—	plomb	—	14 et 41 —
4	—	tôle et bitume	—	26 et 285 —
1	—	verre	—	49
11	—	fonte	—	79 et 500

Les résultats des expériences ont été résumées par M. Darcy dans une série de tableaux qui lui ont permis d'établir les formules et les coefficients pratiques que nous avons précédemment reproduits.

Nous mentionnerons pour mémoire ses expériences, très-intéressantes au point de vue théorique, sur la répartition des vitesses dans la section d'un tuyau : il déterminait les vitesses au moyen d'un tube de Pitot très-délié, introduit dans la conduite à une profondeur variable. Les formules de M. Maurice Lévy sont d'accord avec les résultats expérimentaux de Darcy.

A la fin de son mémoire intitulé : *Recherches expérimentales sur le mouvement de l'eau dans les tuyaux*, Darcy a placé des tables pratiques destinées à faciliter la solution des problèmes de distribution ; nous reprocherons à ces tables de

s'appliquer uniquement à des tuyaux neufs ; comme on ne doit en pratique compter que sur le rendement des tuyaux ayant un certain temps de service, il faut corriger les résultats des tables ainsi que nous l'avons dit.

Nous avons remanié ces tables de manière à les rendre uniquement applicables aux tuyaux recouverts de dépôts et, par là, nous les avons mises sous une forme réellement pratique.

Pertes de charge produites par les changements de diamètre, les branchements et les coudes. 1° Changement de diamètre. — Lorsqu'un courant liquide passe d'un tuyau *a* dans un tuyau *b* de diamètre différent, il y a production de chocs et de tourbillons qui absorbent une certaine quantité de force vive représentée par une perte de charge. Le liquide renfermé dans les angles du plus grand tuyau *b* se renouvelle lentement et est agité de mouvements circulaires.

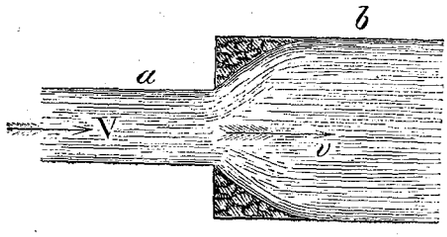

Fig. 3.

Nous avons à la page 42 de l'hydraulique examiné ce phénomène et évalué la perte de charge, qui est égale à la hauteur représentative d'une vitesse égale elle-même à la différence des vitesses d'écoulement dans les deux tuyaux.

Autrement dit, si V est la vitesse moyenne d'écoulement dans le tuyau *a* et *v* la vitesse moyenne dans le tuyau *b*, la perte de charge est égale à

$$\frac{(V-v)^2}{2g}$$

2° **Branchements.** — Soit un tuyau principal *ab*, figure 4, sur lequel se greffe un tuyau secondaire *c*, on a ce qu'on appelle un branchement.

Les eaux venant de *a* se répartissent dans les deux directions *b* et *c* et la vitesse

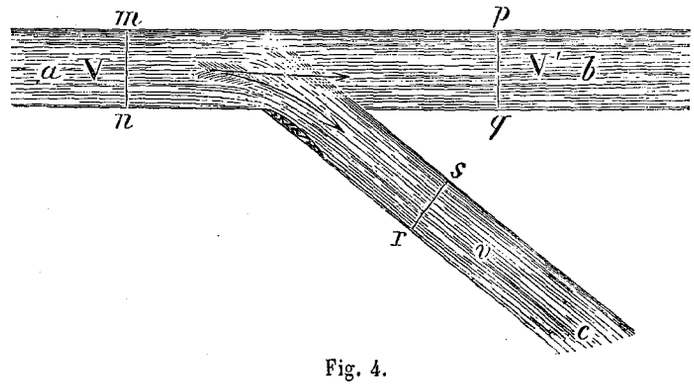

Fig. 4.

V' dans le tuyau principal à l'aval du branchement est moindre que la vitesse V à l'amont.

D'autre part, les eaux s'infléchissent pour passer de *a* en *c*, elles se contractent à l'entrée du tuyau *c* ; il y a donc une perte de force vive et par suite une perte de charge entre les sections *mn* et *rs*. Il se forme un remous, notamment dans l'angle amont de la conduite,

La perte de charge est difficile à apprécier, elle dépend évidemment de la direction du branchement par rapport à la conduite principale.

Presque toujours les branchements sont normaux ; les expériences de Belanger et Genieys semblent indiquer que, dans ce cas, la perte de charge, lorsqu'on

passe de la section *mn* dans la section *rs*, est égale à deux fois la hauteur représentative de la vitesse d'écoulement v dans cette dernière section *rs*.

Ainsi la perte de charge serait de $\left(\frac{2v^2}{2g}\right)$,

Les déviations et les remous paraissent avoir leur action principale à l'entrée du branchement *c*, cependant ils doivent se faire sentir aussi sur la conduite maîtresse et les chocs contre l'angle aigu du branchement ne sont pas sans absorber une certaine portion de force vive.

Dans la section d'aval *pq* de la conduite maîtresse, la vitesse V' est moindre que la vitesse V dans la section d'amont *mn*, puisqu'il passe moins de liquide dans la première que dans la seconde. S'il n'y avait point perte de charge de *mn* en *pq*, la diminution de vitesse se traduirait par une augmentation équivalente du niveau pézométrique, c'est-à-dire par un relèvement de la ligne de charge.

Dans la pratique, on admet que ce relèvement est absorbé par la perte de charge et on conserve le même niveau piézométrique à l'aval qu'à l'amont du branchement.

Il serait facile de déterminer expérimentalement les pertes de charge qui se produisent au passage des branchements ; mais les expériences n'ont pas été entreprises parce qu'elles ne présentent pas un grand intérêt pratique ; généralement, la longueur des conduites est assez considérable pour que les frottements sur les parois possèdent une influence prépondérante et pour qu'on puisse négliger les pertes de charge secondaires.

Néanmoins, il est possible d'en tenir compte en les évaluant comme nous venons de le faire tout à l'heure.

3° **Coudes.** — Les coudes déterminent une inflexion de la masse liquide qui parcourt le tuyau et entraînent nécessairement une perte de force vive en même temps que la production d'une force centrifuge.

Force centrifuge. — Cette force centrifuge a pour expression $\left(\frac{m.\ v^2}{R}\right)$ m étant la masse du liquide en mouvement, v sa vitesse et R le rayon moyen du coude.

Considérons une conduite de $0^m,50$ de diamètre parcourue par de l'eau animée d'une vitesse de 2^m à la seconde ; cette conduite est courbée suivant un arc de 2^m de rayon, et on demande la valeur de la force centrifuge déployée sur un mètre courant du coude.

La masse est le quotient du poids par l'accélération g de la pesanteur, par suite :

$$m = \frac{\pi r^2.1000}{g} = \frac{3.14 \times 1000}{16.9,8} = 20$$

$$v^2 = 4 \quad R = 2 \quad m\frac{v^2}{R} = 40 \text{ kilog.}$$

Ainsi, la conduite exercera une poussée centrifuge de 40 kilogrammes par mètre courant du coude, et on devra s'opposer à cette poussée qui déformerait la conduite ; à cet effet, la conduite maîtresse étant posée en galerie, on la relie par des supports en fonte au massif de la maçonnerie.

Perte de charge. — M. Mary a trouvé que les pertes de charge par coude ne dépassaient pas $0^m,002$ pour des vitesses de $0^m,58$ à $0^m,60$; pour des vitesses de 1 mètre, la perte de charge produite par un coude correspondrait à un accroissement de la longueur de la conduite égal à quatre fois son diamètre.

Quelques expériences de Dupuit ont montré aussi que les pertes de charge dues

aux coudes et étranglements correspondaient à l'accroissement de résistance qui résulterait d'un léger allongement du tuyau.

La découverte d'une formule qui donnerait exactement l'influence des angles dans les conduites ne saurait, dit Dupuit, avoir beaucoup d'utilité pratique.

Il est inutile de faire des calculs spéciaux au sujet des résistances autres que celle qui résulte du frottement à la paroi. Les expériences montrent en outre que l'avantage d'avoir une conduite plus ou moins rectiligne est de peu d'importance et qu'il ne faut jamais faire de grands sacrifices pour l'obtenir. Il va sans dire qu'il ne faut pas multiplier sans nécessité les coudes et les sinuosités; mais, quand ils sont motivés par l'état des lieux et qu'on ne saurait les faire disparaître qu'avec de grandes dépenses, il faut s'y résigner. La moindre augmentation du diamètre de la conduite dans cette partie ferait plus que compenser la perte de charge due à ces circonstances.

En somme, pour tenir compte de l'influence des étranglements, des branchements et des coudes, il suffit d'ajouter à la longueur réelle de la conduite une certaine quantité proportionnelle à son diamètre, et l'on pourra profiter de cette circonstance pour arrondir le chiffre de cette dimension, ce qui abrégera les calculs.

TUYAUX A DIAMÈTRE OU A DÉBIT VARIABLE

Lorsqu'il s'agit de tuyaux à diamètre ou à débit variable, le mouvement uniforme n'existe plus, et les circonstances du mouvement, bien que constantes dans une section donnée, varient d'une section à l'autre.

Cherchons à établir dans ce cas l'équation fondamentale du mouvement.

Equation fondamentale du mouvement varié. — Pour préciser la position des sections du tuyau, désignons par s la distance où elles se trouvent de l'origine, distance comptée sur l'axe du tuyau; deux sections voisines sont situées à la distance ds l'une de l'autre et la différence de leurs charges est mesurée par la différence dy de leurs niveaux piézométriques.

dy mesure donc la perte de charge lorsque le liquide passe de la première à la seconde section.

Cette perte de charge est la somme de la perte de charge due à la variation des vitesses et de la perte de charge absorbée par les frottements.

1° Pour avoir la perte de charge due à la variation des vitesses, il faudrait considérer les vitesses propres de chaque filet et prendre les différences des hauteurs dues à ces vitesses. En l'état actuel de la science, il est impossible d'opérer ainsi parce qu'on ne connaît pas d'une manière suffisamment exacte la loi de la répartition des vitesses dans une section. Pour simplifier, on admet que tous les filets liquides ont la même vitesse u égale à la vitesse moyenne, c'est-à-dire au quotient du débit par la section. La différence des charges dues aux vitesses $(u + du)$ et u est égale à

$$\frac{(u+du)^2-u^2}{2g} \quad \text{c'est-à-dire à} \quad \frac{udu}{g};$$

c'est la valeur de la perte de charge produite par la variation des vitesses.

2° Quant à la perte de chargè due aux frottements, nous l'avons évaluée en bloc dans le cas du mouvement uniforme par l'équation :

$$j.r = b_1 u^2 ;$$

j est la perte de charge par mètre courant ; les deux sections voisines considérées se trouvant à la distance ds, il en résulte une perte de charge $j.\,ds$.

Nous faisons, il est vrai, une hypothèse non justifiée en admettant que la valeur des frottements est la même dans le mouvement varié que dans le mouvement uniforme ; il est probable qu'il n'en est pas ainsi. Cependant, si les variations de diamètre et de débit ne sont pas trop brusques, l'hypothèse semble naturelle, et comme on n'a rien de mieux pour la remplacer, on la conserve.

Égalant d'une part la chute des niveaux piézométriques, et d'autre part la somme des pertes de charge, nous trouvons pour l'équation fondamentale du mouvement varié dans les tuyaux la formule :

$$dy = \frac{u.du}{g} + \frac{b_1 u^2}{r}.ds \qquad (1)$$

qu'il faut toujours combiner avec l'équation du débit :

$$q = \pi.r^2.u \qquad (2)$$

1° Conduites simples à diamètre variable et à débit constant.

Considérons une conduite de longueur l, à rayon r variable et à débit q constant. Soit y la perte de charge, lorsqu'on passe de la section initiale où la vitesse est u_0 à la section finale où la vitesse est u.

Intègrons l'équation (1) entre $(s=o)$ et $(s=l)$, il vient :

$$y = \frac{u^2 - u_o^2}{2g} + \int_o^l \frac{b_1 u^2}{r}.ds \qquad (3)$$

le premier terme du second membre est toujours très-faible par rapport au second terme et on n'en tient pas compte.

D'autre part, nous savons que le coefficient b_1 varie avec le rayon r, mais que cependant ses variations sont peu considérables pour les tuyaux d'un diamètre supérieur à $0^m,06$; il est donc permis, dans une formule approximative comme celle qui nous occupe, de substituer au coefficient b_1 sa valeur moyenne.

Cette valeur moyenne est 0,000625 pour les tuyaux neufs
et 0,00125 pour les tuyaux ayant quelque service
ce dernier nombre est égal à la fraction $\frac{1}{800}$

Ainsi l'équation (4) prend la forme plus simple

$$y = \frac{1}{800} \int_o^l \left(\frac{u^2}{r}.ds \right)$$

remplaçant u par sa valeur $\left(\frac{q}{\pi r^2} \right)$, elle devient :

$$y = \frac{q^2}{800\,\pi^2} \int_o^l \frac{ds}{r^5}. \qquad (4)$$

Cette équation (4) nous donne tout d'abord une conséquence importante: la quantité $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ à intégrer dépend uniquement des dimensions du tuyau, elle n'est liée ni au débit q ni à la charge (y); donc, pour une charge donnée y, le débit restera constant, quelque soit le tuyau, pourvu que l'intégrale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ reste elle-même constante.

Tuyaux équivalents. — Deux tuyaux sont équivalents lorsqu'ils donnent le même débit sous la même charge.

D'après la remarque précédente, cela arrivera lorsque l'intégale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ sera constante. Or, dans le cas d'un diamètre uniforme, cette intégrale devient $\left(\frac{l'}{r'^5}\right)$; donc, le tuyau cylindrique équivalent d'un tuyau à diamètre variable s'obtient par l'équation

$$\frac{l'}{r'^5} = \int_0^l \frac{ds}{r^5}$$

qui déterminera l' ou r', suivant qu'on se donnera l'une ou l'autre de ces deux variables.

Si un tuyau a un rayon qui varie par saccades et non d'une manière continue et qu'il se compose de longueurs successives.

$$l_0 \quad l_1 \quad l_2 \quad l_3 \ldots\ldots$$

ayant pour rayons

$$r_0 \quad r_1 \quad r_2 \quad r_3 \ldots\ldots$$

le tuyau cylindrique équivalent résultera de l'équation :

$$\frac{l'}{r'^5} = \frac{l_0}{r_0^5} + \frac{l_1}{r_1^5} + \frac{l_2}{r_2^5} \ldots\ldots = \Sigma\left(\frac{l}{r^5}\right)$$

L'équation (4), résolue par rapport au débit, prend la forme:

$$q^2 = \frac{800.\pi^2.y}{\int\left(\frac{ds}{r^5}\right)} \tag{5}$$

Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de même longueur à rayon constant. — Soit une conduite dont la longueur L se subdivise en longueurs élémentaires l, l', l''..... ayant pour rayons respectifs r, r', r''...., on demande le rayon R de la conduite équivalente de même longueur L.

Ce rayon résultera de l'équation :

$$\frac{L}{R^5} = \frac{l}{r^5} + \frac{l'}{r'^5} + \frac{l''}{r''^5} + \ldots\ldots$$

Il est facile de la calculer grâce aux tables qu'on trouvera à la fin de ce chapitre.

Ainsi la conduite équivalente aura même longueur que la conduite complexe, même charge et même débit. Une seule chose variera, qui du reste est peu importante, c'est la forme de la ligne de charge entre l'origine et l'extrémité de la conduite.

Remarque: De l'équation précédente résulte encore ceci :

Une conduite, formée de plusieurs tuyaux de rayons différents, porte à l'extrémité le même débit, quel que soit l'ordre dans lequel ces tuyaux se succèdent.

Il ne faut pas oublier que toutes ces conclusions s'appliquent aux cas où les pertes de charge produites par les changements de diamètres sont négligeables en présence des pertes de charge engendrées par les frottements, c'est ce qui arrive toutes les fois que les tuyaux différents ont, par rapport à leur diamètre, une longueur considérable, et c'est le cas ordinaire de la pratique.

Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de rayon déterminé. — Étant donnée une conduite composée de tronçons l, l', l''.. ayant pour rayons r, r', r''...., trouver une conduite équivalente ayant pour rayon R.

La longueur de cette conduite s'obtiendra par l'équation :

$$\frac{L}{R^5} = \frac{l}{r^5} + \frac{l'}{r'^5} + \frac{l''}{r''^5} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$

Veut-on que le rayon R soit égal à l'un des rayons r de la conduite primitive? on trouvera pour la longueur

$$L = l + l' \frac{r^5}{r'^5} + l'' \frac{r^5}{r''^5} + \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$

ainsi la longueur L est toujours supérieure à l.

Soit une conduite de longueur L et de rayon R, on lui trouve un débit insuffisant et, pour l'augmenter, on double le rayon sur la moitié de la longueur par exemple, voyons quelle augmentation de débit en résultera :

L'intégrale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ est dans le premier cas égale à $\left(\frac{L}{R^5}\right)$ et devient dans le second cas :

$$\frac{1}{2}\frac{L}{R^5} + \frac{1}{2}\frac{L}{(2R)^5} \quad \text{ou} \quad \frac{33}{64}\frac{L}{R^5}$$

D'après l'équation (5) le débit augmente donc dans le rapport de 1 à $\sqrt{\frac{33}{64}}$ ou dans le rapport de $\sqrt{64}$ à $\sqrt{33}$, soit 1,4; le débit n'aura donc augmenté que des quatre dixièmes de sa valeur primitive, et cependant on aura effectué une dépense considérable.

Au contraire, doublons le diamètre sur toute la longueur, le débit augmentera dans le rapport de $\sqrt{32}$ à 1. C'est-à-dire qu'il deviendra 5,66 fois plus grand. — On tirera donc d'une dépense double un profit 14 fois plus grand.

— « On voit par là, dit Dupuit, que, *quand une conduite se trouve étranglée par un petit diamètre sur une grande étendue, le produit de l'extrémité est pour ainsi dire déterminé par cette portion de conduite.* On peut donc, dans les calculs de débit, négliger toutes les portions de conduite ayant un diamètre relativement considérable et ne tenir compte que des portions de petit diamètre.

Avantage qu'il y a à réunir plusieurs conduites en une seule. — Supposez deux réservoirs communiquant par plusieurs conduites de rayons r, r', r''... que l'on veut remplacer par une seule conduite de rayon R. Nous admettons que toutes ces conduites ont à peu près la même longueur l.

D'après l'équation (5) le débit de chaque conduite est proportionnel à $\sqrt{\frac{r^5}{l}}$, et le débit de la conduite unique sera égal à la somme des débits des conduites primitives si :

$$\sqrt{\frac{R^5}{l}} = \sqrt{\frac{r^5}{l}} + \sqrt{\frac{r'^5}{l}} + \ldots\ldots$$

ou, ce qui revient au même, si :

$$\sqrt{R^5} = \sqrt{r^5} + \sqrt{r'^5} + \sqrt{r''^5} + \ldots\ldots$$

Il est donc facile de remplacer l'ensemble des conduites primitives par une seule conduite équivalente, et le rayon R se déterminera sans peine à l'aide de la table qui donne les cinquièmes puissances des rayons.

Cette table montre immédiatement qu'une conduite de $0^m,25$ de diamètre peut remplacer dix conduites de $0^m,10$ et deux conduites de $0^m,19$.

Ainsi, il y a un avantage énorme à ne point fractionner un débit entre plusieurs conduites, à moins d'y être forcé.

Influence du nombre des conduites sur le prix de leur établissement. — Nous empruntons ce paragraphe à Dupuit, qui s'exprime ainsi :

Pour conduire une certaine quantité d'eau à un point donné, le parti le plus économique est toujours de le faire au moyen d'un seul tuyau. En effet, c'est un résultat d'expérience qui sera expliqué plus loin, que le prix du mètre courant du tuyau mis en place est proportionnel au diamètre.

La dépense à faire pour une conduite unique de rayon r sera donc (A,l,r) à Paris, $A = 200$ francs environ); pour deux conduites de rayon r', donnant même débit que la première, la dépense sera $(2A,l,r')$ et l'on aura la relation :

$$\sqrt{r^5} = 2\sqrt{r'^5} \quad \text{d'où} \quad r' = \frac{r}{\sqrt[5]{4}}$$

L'expression de la dépense devient :

$$Alr\frac{2}{\sqrt[5]{4}} = Alr\sqrt[5]{8}$$

pour trois conduites on aurait de même une dépense de :

$$A.l.r\sqrt[5]{27}$$

et pour un nombre n de conduites :

$$A.l.rn^{\frac{3}{5}}$$

La dépense pour une conduite étant représentée par.	100
Elle sera, pour deux conduites débitant le même volume.	152
— trois —	193
— quatre —	230

La recherche des conduites équivalentes suppose l'égalité des charges. — Il ne faut pas oublier que la recherche des conduites équivalentes a son point de départ, dans l'équation (4) ou dans l'équation (5), et qu'elle suppose que la quantité y reste constante. Cette quantité y est la charge ou la différence des niveaux piézométriques entre l'origine et l'extrémité de la conduite.

Il faut donc, pour que l'on puisse appliquer à divers systèmes de conduites les calculs de l'équivalence, que pour ces divers systèmes les charges entre le point de départ et le point d'arrivée soient exactement les mêmes.

2° Conduites simples à diamètre constant et à débit variable.

Dans une distribution d'eau, il existe en général une ou plusieurs conduites principales, qui donnent l'eau, à droite et à gauche, aux conduites secondaires de toutes natures.

Chaque conduite principale, sur la longueur où elle conserve un diamètre constant, peut être considérée, comme une conduite simple, à débit variable, et nous allons chercher ce que deviennent dans ce cas les formules fondamentales.

Conduite simple à diamètre constant avec service de route uniforme. — Il y a deux parties à considérer dans une conduite : le service de route et le service d'extrémité. Le service de route consiste en l'alimentation de tous les branchements secondaires que la conduite rencontre; le service d'extrémité n'est important que si la conduite débouche dans un réservoir, sinon il rentre dans le service de route.

Considérons donc une conduite simple à diamètre constant avec service de route uniforme, c'est-à-dire que la conduite abandonne, par mètre courant, un volume constant q de liquide. Si Q est son débit total à l'origine, ce débit est égal à q,l; la vitesse va, sans cesse, s'affaiblissant de l'origine jusqu'à l'extrémité où elle s'annule; à ce moment le débit total Q a été absorbé par le service de route, et, si l'on remonte de l'extrémité à l'origine, le débit augmente proportionnellement au chemin parcouru, il est de la forme q,s et la longueur s varie de zéro à l.

La formule fondamentale du mouvement varié est :

$$(1) \qquad dy = \frac{u.du}{g} + \frac{b_1 u^2}{r}.ds$$

Les longueurs s étant comptées à partir de l'orifice extrême de la conduite, l'équation précédente doit être intégrée entre l et zéro.

En une section située à la distance s de l'orifice, la vitesse u est égale à $\left(\frac{qs}{\pi r^2}\right)$; remplaçant u par cette valeur et négligeant le premier terme du second membre de l'équation (1), terme dont l'intégrale représente la hauteur due à la vitesse, à l'origine de la conduite et qui est généralement petit par rapport aux pertes de charge dues aux frottements, l'équation (1) devient :

$$(2) \qquad dy = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5} \int_l^0 s^2.ds$$

Et la perte de la charge totale y, abstraction faite de son signe, est donnée par :

$$y = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{l^3}{3}$$

Remplaçant enfin q par $\left(\frac{Q}{l}\right)$, il vient :

$$y = \frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{l}{3}. \tag{4}$$

Si l'on voulait obtenir la charge en une section située à une distance x de l'orifice, il faudrait intégrer l'équation (2) entre x et o et elle deviendrait :

$$y = \frac{b_1 Q^2}{\pi^2 . r^5 . l^2} \cdot \frac{x^3}{3} \tag{5}$$

C'est là l'équation de la ligne de charge sur toute l'amplitude de la conduite; elle est facile à construire et l'on voit que c'est une parabole du troisième degré.

« La forme de cette courbe, dit Dupuit, tient à ce que, près du réservoir, la vitesse de l'eau est très-grande et presque nulle vers l'extrémité de la conduite. On a dû remarquer une certaine analogie entre les lignes de charge et les polygones funiculaires chargés de poids, entre la parabole de charge, dans le cas de la distribution uniforme, et la parabole des chaînes des ponts suspendus. Dans ce dernier cas, on a une parabole du second degré parce la tension est proportionnelle à la première puissance du poids, tandis que, pour les tuyaux, les pertes de charge étant proportionnelles à la deuxième puissance du débit, le degré de la parabole se trouve augmenté d'une unité. Cette analogie de deux théories, qui au premier aspect n'ont rien de commun, se continue beaucoup plus loin. »

Comparaison entre un service de route uniforme et un service égal à l'extrémité. — L'équation (5) de la page 14 nous donne la perte de charge, qui se produit dans une conduite à diamètre et à débit uniformes, c'est-à-dire dans une conduite qui débite le volume entier Q à son extrémité. Nous avons alors :

$$j = \frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5}$$

et pour la longueur l :

$$jl \text{ ou } y = \frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5} . l$$

Dans le cas que nous venons d'étudier, diamètre constant, service de route uniforme et service d'extrémité nul, la perte de charge résulte de l'équation :

$$y = \frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{l}{3}$$

Ainsi, *une conduite qui débite uniformément sur toute sa longueur un volume total* Q *consomme trois fois moins de charge que si elle débitait ce même volume à son extrémité.*

On peut dire encore : *à charge égale, le débit total dans le cas du service uniforme est égal au débit total dans le cas du service d'extrémité multiplié par* $\sqrt{3}$ *ou par* 1,732 ;

A charge égale et à débit égal, le rayon de la conduite dans le cas du service

d'extrémité sera égal au rayon de la conduite, dans le cas du service uniforme de route, multiplié par $\sqrt[5]{3}$ ou environ par $\frac{5}{4}$.

Conduite simple à diamètre constant avec service mixte. — Généralement, le service uniforme de route coexiste avec un service d'extrémité.

Si l'on désigne par $\left(\frac{Q_1}{l}\right)$ le service uniforme par mètre courant et par P le service d'extrémité, le débit en une section située à la distance s de l'extrémité sera égal à :

$$P + \frac{Q_1}{l} . s$$

Introduisons ce débit dans l'équation différentielle (1), en négligeant toujours le premier terme du second membre de cette équation, terme dont l'intégrale n'a qu'une valeur insignifiante, nous trouvons :

$$dy = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \int_l^o \left(P + \frac{Q_1 s}{l}\right)^2 . ds$$

et l'intégration nous donne :

$$(6) \qquad y = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \left(P^2 l + \frac{P.Q_1}{l} l^2 + \frac{Q_1^2}{l^2} \frac{l^3}{3}\right) = \frac{b_1 l}{\pi^2 r^5} \left(P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2\right)$$

Et même, en intégrant entre x et o au lieu d'intégrer entre l et o, on aurait l'équation de la ligne de charge, analogue à l'équation (5) et aussi facile à construire.

Veut-on savoir quel serait, pour la même charge et la même longueur, le débit Q′ à l'extrémité de la conduite qui nous occupe, tout service de route étant supprimé? Ce débit s'obtiendrait par l'équation :

$$y = \frac{b_1 l}{\pi^2 r^5} Q'^2 .$$

Si on la compare à l'équation (6), on arrive à la relation

$$(6\,bis) \qquad Q'^2 = P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2 ,$$

relation qui nous permet de poser les deux inégalités ci-après :

$$Q' > P + \frac{1}{2} Q_1 \qquad Q' < P + \frac{Q_1}{\sqrt{3}}$$

or :

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}577$$

Donc Q′ est compris entre

$$P + 0{,}50\,Q_1 \quad \text{et} \quad P + 0{,}57\,Q_1$$

et l'on peut dire, avec une approximation bien suffisante pour la pratique, que

$$(7) \qquad Q' = P + 0{,}55\,Q_1 .$$

Ainsi, on peut ne pas se préoccuper du service de route et calculer la conduite comme si elle n'avait qu'un service d'extrémité, pourvu qu'on ajoute à ce service les 0,55 *du service de route* Q_1.

L'équation (7) permet encore de résoudre les problèmes suivants :

1° *Une conduite donne un débit unique* Q′ *à son extrémité, on lui emprunte un service de route uniforme dont le volume total est* Q_1, *on demande ce que deviendra le débit d'extrémité.*

Le débit d'extrémité s'obtient en résolvant l'équation (7) par rapport à P

$$P = Q' - 0{,}55\,Q_1 \tag{8}$$

2° *Une conduite donne un débit unique* Q′ *à son extrémité, on peut se contenter d'un débit d'extrémité égal seulement à* P, *quel sera le cube restant disponible pour un service uniforme de route?*

Le service de route disponible s'obtiendra en résolvant l'équation (7) par rapport à Q_1

$$Q_1 = \frac{(Q' - P)}{0{,}55} = 1{,}82(Q' - P) \tag{9}$$

Conduites à diamètre variable. — Nous pourrions faire ici la théorie des conduites à diamètre variable, mais elle est sans grande utilité pratique, puisqu'on emploie toujours des tuyaux cylindriques, et que par suite on ne peut obtenir pour les diamètres des variations continues.

On trouvera cette théorie des conduites à diamètre variable dans le traité de Dupuit qui, du reste, a soin de faire remarquer lui-même le peu d'utilité de la question.

Il y a presque toujours avantage à adopter un diamètre constant pour une conduite principale, car il peut toujours arriver qu'on demande exceptionnellement à une conduite un service d'extrémité qu'on ne pourra réaliser qu'avec un diamètre constant.

Du reste, si une conduite principale paraît devoir être construite avec des diamètres décroissants, on la divisera en plusieurs sections, et chacune d'elles sera traitée comme une conduite à diamètre constant à laquelle on pourra appliquer les formules précédentes.

Conduite simple à diamètre et à débit variable. — La figure 5 représente une conduite simple à diamètre et à débit variables; le diamètre varie par transitions brusques, et le débit varie de même parce qu'on établit de place en place des prises d'eau avec robinets r_1, r_2.

Si l'on part du réservoir alimentaire A et que l'on suive le cours de la conduite, il est facile d'apprécier les pertes de charge successives.

Sur la longueur l_1 qui précède le robinet r_1, le débit ne varie pas et on peut le calculer ainsi que la vitesse moyenne u_1; une première perte de charge, égale à $\frac{1}{2}\frac{u_1^2}{2g}$, se produit par la contraction de la veine à l'entrée dans la conduite; cette perte de charge est minime par rapport à la perte de charge principale déterminée par les frottements; la valeur jl_1 de cette dernière est donnée par l'expression $\frac{b_1 u^2 l_1}{r}$.

On connaît par là la quantité totale y_1 dont s'abaisse la ligne de charge lorsqu'on passe du réservoir A au robinet r_1.

Quand on s'est de nouveau avancé de la longueur l_2, on rencontre un rétrécissement du tuyau auquel correspond une perte de charge produite par le choc et égale à $\frac{(u_3-u_2)^2}{2g}$; ajoutant la charge absorbée par les frottements sur la longueur l_2, on obtient la quantité dont la ligne de charge s'abaisse dans l'intervalle l_2, on connaît donc l'abaissement y_2 que la charge a subi depuis le réservoir A.

Opérant ainsi de proche en proche, on construit rapidement le polygone qui

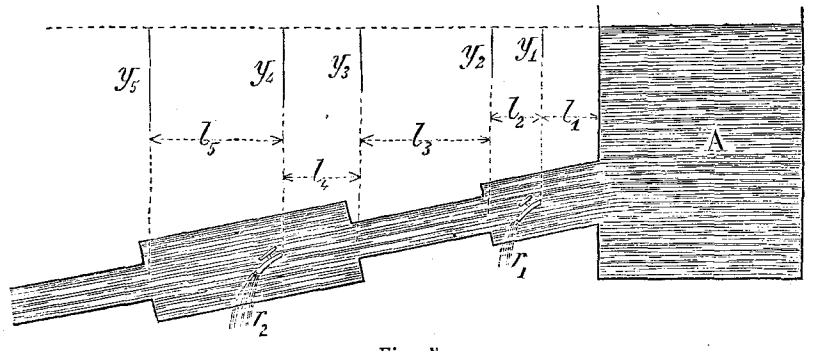

Fig. 5.

représente la ligne de charge, et en chaque point l'on sait à quelle hauteur peut s'élever l'eau de la conduite. Comme il faut toujours une certaine charge pour que l'écoulement se produise, les orifices de prise d'eau doivent se trouver au-dessous de la ligne de charge.

Avec les robinets et orifices dont on se sert dans la pratique, il convient de ménager sur chaque orifice d'écoulement une charge de $0^m,50$ au moins.

Il va sans dire qu'à cette charge il faut ajouter celle qui est consommée par le frottement dans la conduite secondaire qui joint l'orifice à la conduite principale; cette conduite secondaire se compose généralement d'un tuyau en plomb de petit diamètre, elle absorbe une charge assez considérable, et il convient d'en tenir soigneusement compte; la contraction à l'entrée de la conduite secondaire ou branchement détermine, ainsi que nous l'avons vu, une perte de charge double de la hauteur due à la vitesse moyenne de l'eau dans cette conduite.

Le problème qui consiste, étant donné un réservoir et une conduite, à calculer jusqu'à quelle hauteur le liquide s'élèvera en un point quelconque de la conduite ou d'un branchement de diamètre donné, ce problème est donc facile à résoudre.

Mais, dans la pratique, c'est plutôt le problème inverse qui se pose : on est en présence d'orifices de sujétion, les points élevés d'une rue, par exemple, et il faut que l'eau les atteigne avec une charge suffisante pour l'écoulement, on doit calculer en conséquence les diamètres de la conduite. C'est par tâtonnements qu'on opère; on connaît le débit et la charge en chaque point, on peut donc calculer le diamètre de la conduite correspondante. Chaque portion de conduite est traitée comme une conduite simple à diamètre et à débit constants; dans une première opération, on néglige les pertes de charge secondaire dues aux contractions, aux branchements et aux variations brusques de diamètre; on établit ainsi les dimensions de la conduite, puis on cherche si, en tenant compte de toutes les pertes de charge, elles donneront un résultat satisfaisant, et si l'eau pourra parvenir à tous les points où l'on veut la conduire.

Calcul des conduites complexes ou d'un système entier de conduites. —

Le calcul d'un système entier de conduites ne présente pas plus de difficultés que le précédent.

1er Problème. — 1° Si le système est donné avec toutes ses dimensions, avec les niveaux des réservoirs alimentaires, et qu'on veuille déterminer en chaque point la charge et le débit, on opère de proche en proche sur les tuyaux succes ifs. On suppose déterminée en chaque point d'embranchement de la conduite principale la hauteur de la charge, et comme on peut, dans une première approximation, négliger les pertes secondaires dues aux branchements, on admet qu'en chaque point, sur lequel plusieurs tuyaux se soudent, la charge est la même pour tous ces tuyaux. S'il existe n points d'embranchement dans le système, on a donc n inconnues y qui sont les hauteurs des niveaux piézométriques en ces n points.

Un tuyau quelconque aboutit soit à un réservoir dont le niveau est donné, soit à un point d'embranchement dont la charge y est supposée connue ; on est donc censé connaître la charge aux deux extrémités de ce tuyau, et comme ses dimensions sont données, on calcule la dépense q par les formules relatives aux conduites simples. De la sorte, s'il existe m tuyaux, on établit m équations qui renferment $(m+n)$ inconnues, savoir :

Les n valeurs des charges y aux points d'embranchement ;

Les m valeurs des dépenses q dans les m tuyaux du système.

D'autre part, si l'on considère le premier tronçon de la conduite principale qui prend l'eau au réservoir, on peut en déterminer le débit par la formule ordinaire ; on a de la sorte le volume qui arrive au premier point d'embranchement ; on exprime que ce volume est égal à la somme des volumes qui s'écoulent par tous les tuyaux aboutissant à l'embranchement considéré, et il en résulte une première équation.

Une équation analogue correspond à chacun des n points d'embranchement. Cela fait donc n équations nouvelles, et nous avons $m+n$, équations qui nous suffisent pour déterminer nos $m+n$ inconnues.

On pourra se contenter presque toujours du calcul approximatif que nous venons d'indiquer. Cependant, si l'on veut tenir compte des pertes de charge secondaires, on les évaluera par les résultats du premier calcul, et on corrigera en conséquence les valeurs trouvées pour les charges à l'extrémité de chaque tuyau. Avec ces charges rectifiées, on recommencera les calculs qui conduiront à des résultats plus approchés.

La solution du problème paraîtra plus nette et plus simple lorsque le lecteur en aura fait quelque application numérique.

On ne sera jamais embarrassé sur le point de savoir dans quel sens l'écoulement se produira dans tel ou tel tuyau ; l'écoulement va toujours du niveau piézométrique le plus élevé vers le plus bas, quelle que soit l'inclinaison du tuyau.

2e Problème. — *On donne le plan et le nivellement d'un système de conduites avec les niveaux des bassins d'alimentation, calculer les diamètres des divers tuyaux de manière à obtenir pour chacun une dépense déterminée.* — C'est le problème inverse du précédent ; pris dans toute sa généralité, il comporte une infinité de solutions. Prenons pour inconnues les valeurs de la charge y aux n points d'embranchement, et supposons d'abord ces quantités connues. Pour chaque tuyau, nous aurons les charges à ses extrémités, et nous pourrons établir l'équation relative aux conduites simples. Cela nous donnera autant d'équations que de tuyaux, soit m équations renfermant $(m+n)$ inconnues, qui sont les charges y et les rayons r des conduites.

Quant aux n équations de dépense qui expriment qu'en chaque embranchement le débit de la conduite maîtresse se répartit entre tous les tuyaux qu'elle alimente, comme les m dépenses sont des données du problème, il ne reste plus que des équations de condition, des égalités auxquelles les données doivent satisfaire, mais qui ne peuvent servir à déterminer les inconnues.

Nous n'avons donc en tout que m équations pour déterminer $m+n$ inconnues, de sorte que le problème n'a pas une solution unique ; si on adopte pour les charges y aux n points d'embranchement des valeurs quelconques et qu'on les porte dans les équations des tuyaux, celles-ci ne renfermeront plus comme inconnues que les rayons ; il y aura autant d'équations que d'inconnues, et l'on obtiendra les valeurs cherchées des rayons.

Que l'on prenne pour point de départ un système différent de valeurs de y, on obtiendra de nouvelles valeurs pour les rayons des tuyaux, et par suite un nouveau système de conduites.

Il va sans dire qu'en opérant ainsi d'une manière arbitraire, et en choisissant à l'aveugle les hauteurs des n colonnes piézométriques, on se heurtera à des impossibilités, ou bien on arrivera à donner à certaines conduites des diamètres disproportionnés à leur dépense. Les solutions obtenues pourront être théoriquement possibles, mais pratiquement inadmissibles.

Il faut donc trouver un moyen de faire cesser l'indétermination. On y arrive par la recherche de la dépense *minima*.

Système conduisant au minimum de dépense. — Nous avons déjà vu que le prix d'établissement d'une conduite était sensiblement proportionnel à son rayon, et pouvait approximativement se représenter à Paris par la formule $200.\,r$, de sorte que le prix d'une conduite de longueur l est égal à $200.\,r.\,l$, et si on a un système de plusieurs conduites ayant les rayons r, r_1, r_2, et les longueurs l, l_1, l_2, la dépense sera proportionnelle à

$$rl+r_1l_1+r_2l_2. \ldots \text{ ou à } \Sigma(rl).$$

pour rendre la dépense *minima*, on devra rendre *minima* la quantité $\Sigma(rl)$.

Considérons, figure 6, un point d'embranchement A où la charge est égale à y.

Un nombre quelconque de tuyaux ayant pour rayons r_1, r_3, r_5, et pour charges à l'origine y_1, y_3, y_5, amènent de l'eau en A ; un nombre quelconque d'autres tuyaux ayant pour rayons r_0, r_2, r_4, et pour charges extrêmes y_0, y_2, y_4, emportent l'eau loin de A.

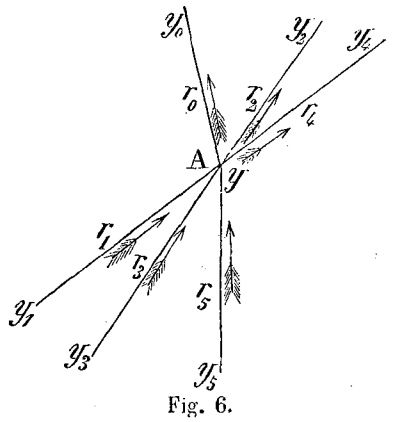

Fig. 6.

Pour que l'écoulement ait réellement lieu dans le sens que nous venons de dire et qui est indiqué par les flèches, il faut que la charge y sur l'embranchement soit inférieure aux charges y_1, y_3, y_5, et supérieure aux charges y_0, y_2, y_4.

Pour les tuyaux dont l'écoulement converge vers A, les charges par mètre courant se trouvent respectivement exprimées par

$$\frac{y_1-y}{l_1} \quad \frac{y_3-y}{l_3} \quad \frac{y_5-y}{l_5} \ldots\ldots$$

et, pour ceux dont l'écoulement est en sens contraire, par :

$$\frac{y-y_0}{l_0} \quad \frac{y-y_2}{l_2} \quad \frac{y-y_4}{l_4} \ldots\ldots$$

Les équations fondamentales

$$rj = b_1 u^2 \quad \text{et} \quad q = \pi r^2 . u$$

de l'écoulement uniforme dans un tuyau cylindrique, donnent

$$(1) \qquad r^5 = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 . j}, \quad \text{ou} \quad r^5 = k . \frac{q^2}{j}$$

car on peut admettre dans un calcul de ce genre que le coefficient de résistance b_1 est constamment égal à sa valeur moyenne.

Dans chacun des tuyaux du système qui nous occupe, le débit est donné, la charge seule est inconnue puisque y est indéterminée, cependant nous avons établi plus haut les valeurs de la charge moyenne j par mètre courant.

Les relations précédentes donnent :

$$\frac{\Sigma(rl)}{\sqrt[5]{k}} = l_1 \sqrt[5]{\frac{q_1^2 l_1}{y_1 - y}} + l_3 \sqrt[5]{\frac{q_3^2 l_3}{y_3 - y}} + \ldots\ldots + l_0 \sqrt[5]{\frac{q_0^2 l_0}{y - y_0}} + \ldots\ldots$$

telle est la quantité qu'il faut rendre minima.

La variable étant la charge y, l'expression précédente atteindra son minimum lorsque sa dérivée par rapport à y sera nulle, ce qui nous conduit à l'équation :

$$(2) \qquad l_1^{\frac{6}{5}} q_1^{\frac{2}{5}} (y_1 - y)^{-\frac{6}{5}} + \ldots\ldots - l_0^{\frac{6}{5}} q_0^{\frac{2}{5}} (y - y_0)^{-\frac{6}{5}} - \ldots\ldots = 0$$

D'après l'équation (1), les charges totales telles que $(y_1 - y)$ ou $(j_1 l_1)$ sont proportionnelles à $\left(\frac{q_1^2 l_1}{r^5_1}\right)$; cela permet de donner à l'équation (2) la forme

$$(3) \qquad \frac{r_1^6}{q_1^2} + \frac{r_3^6}{q_3^2} + \ldots\ldots - \frac{r_0^6}{q_0^6} - \frac{r_2^6}{q_2^6} - \ldots\ldots = 0$$

L'équation (2) ne renferme comme inconnue que y ; on pourra en calculer la valeur par une série de tâtonnements et à cette valeur correspondra le minimum du prix d'établissement des conduites aboutissants à l'embranchement. On répètera le calcul pour chacun des embranchements. Les valeurs d'y étant ainsi déterminées, les n équations des tuyaux permettront d'en calculer les n rayons.

En particulier, si nous appliquons l'équation (3) à deux tuyaux placés bout à bout et ayant le même débit, système qui représente un tuyau à diamètre variable, nous trouvons que le minimum des frais d'établissements sera réalisé lorsque $r_1^6 = r_0^6$ ou $r_1 = r_0$, ce qui signifie que le tuyau le plus économique pour un débit uniforme déterminé est le tuyau à diamètre constant. Nous avions déjà trouvé ce résultat.

En somme, l'analyse précédente donnée par M. Bresse dans son cours d'hydraulique n'est pas d'un grand secours dans la pratique parce qu'elle conduit à des formules trop compliquées.

En réalité, c'est par tâtonnement et par expérience que l'on procède ; on se donne les rayons des divers tuyaux, on fait le calcul des charges et des débits et, d'après les résultats trouvés, on modifie les rayons primitivement adoptés. On calcule d'abord les conduites maîtresses, puis on passe successivement aux conduites secondaires et aux branchements. L'étude des distributions d'eau antérieures, des avantages et des inconvénients qu'elles ont présentés, guide le constructeur et lui indique dans chaque cas les dispositions générales qu'il convient d'adopter.

CONDUITES COMPLEXES AVEC RÉSERVOIRS

Réservoirs destinés à augmenter le débit momentané des conduites. — Le débit maximum d'une conduite simple, à mouvement uniforme, est donné par la formule

$$q^2 = \frac{\pi^2 . j . r^5}{b_1} .$$

La charge (j) par mètre courant sur l'orifice O (figure 7) est égale à $\left(\frac{h}{l}\right)$ et l'équation du débit se met sous la forme

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}} .$$

Il arrive souvent, dit Dupuit, que ce débit, très-suffisant comme débit journalier, ne l'est pas comme débit momentané. Supposons, par exemple, qu'il s'a-

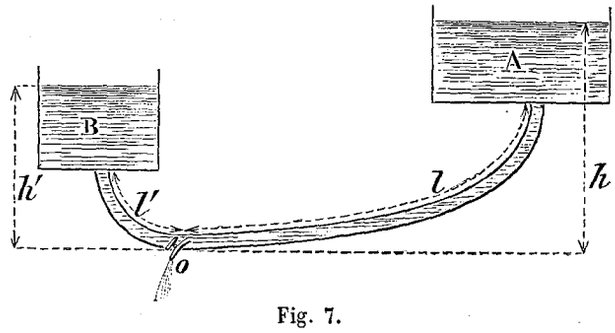

Fig. 7.

gisse d'un établissement de bains consommant 50 mètres par jour, il est clair qu'une conduite donnant un litre par seconde serait suffisante pour la consommation journalière, puisqu'elle fournirait plus de 86 mètres cubes par jour ; mais elle ne le serait pas dans le moment où l'on voudrait remplir à la fois plusieurs baignoires ou plusieurs chaudières ; on remédie à cet inconvénient par l'établissement d'un réservoir B près de l'orifice. Ce réservoir s'emplit pendant le chômage des robinets et leur permet de débiter de grandes masses d'eau à la fois.

Si l' est la longueur de la conduite qui relie le réservoir B à l'orifice et si h'

est la charge correspondante, le débit total en O sera :

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}} + \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h'}{l'}}$$

h' ne sera jamais bien considérable, mais l' peut être très-faible et alors le débit prendra une valeur considérable jusqu'à épuisement du réservoir supplémentaire B.

Les réservoirs, ajoute Dupuit, constituent aussi une excellente précaution contre les incendies et c'est pour cela que tous les établissements publics et industriels en sont pourvus. Supposons, par exemple, qu'un incendie se déclare dans un quartier où la conduite ne peut amener que 20 litres par seconde; c'est en vain que, pour augmenter la masse d'eau disponible, on ouvrira tous les orifices branchés aux environs, ils ne feront jamais que se partager la quantité d'eau amenée par la conduite; il pourra même arriver que ce partage se fasse d'une manière très-vicieuse en donnant plus d'eau aux points les plus éloignés, tandis que les plus voisins en manqueront; c'est ce qui arrive quelquefois à Paris et fait croire à un manque d'eau dans les réservoirs alimentaires, tandis qu'il n'y a qu'une fausse manœuvre de robinets. Un autre avantage des réservoirs, c'est de ne pas faire souffrir les établissements, qui en sont munis, d'une courte interruption de service, par suite de réparations dans les conduites d'alimentation. C'est dans ce but que les distributions, dans ces établissements, se font presque toujours au moyen de branchements spéciaux pris sur leurs réservoirs particuliers. Ces réservoirs sont alimentés par une conduite, que ferme un clapet lorsque l'eau cesse d'y arriver, ou plus ordinairement par une conduite qui dégorge dans leur partie supérieure, auquel cas les robinets sont desservis par un ou plusieurs branchements partant de ces réservoirs.

Les grands réservoirs publics jouent un rôle analogue dans les distributions, ils augmentent la puissance des conduites ou permettent d'en réduire les diamètres.

Orifice alimenté par deux réservoirs. — Considérons un orifice O alimenté

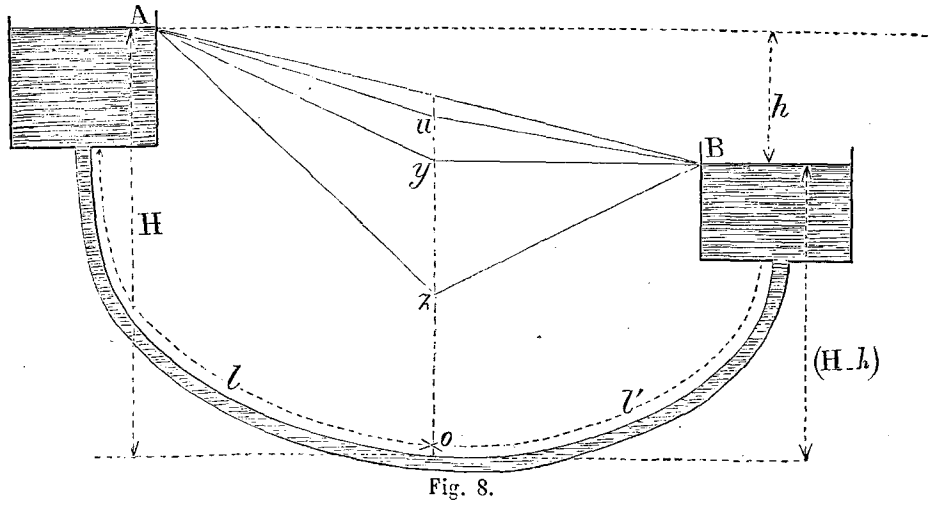

Fig. 8.

par deux réservoirs, A et B (figure 8), dont la différence de niveau est h. Cet orifice est situé à une hauteur H au-dessous du niveau du réservoir A.

Supposons l'orifice fermé, nous avons une conduite réunissant deux réservoirs à niveau différent, système que nous avons étudié, page 15.

En désignant par $(l+l')$ la longueur de la conduite qui réunit les deux réservoirs [1], il passe du réservoir A dans le réservoir B un volume d'eau donné par l'équation :

$$q=\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1}\cdot\frac{l+l'}{h}},$$

et la ligne de charge est la droite AB.

A ce moment, on ouvre très-peu le robinet O afin de livrer passage à un faible débit q_1, le mouvement de l'eau de A vers B n'est pas arrêté pour cela et il arrive encore en B un volume d'eau q' moindre que q.

Cherchons la relation qui existe entre les trois débits $q\ q_1\ q'$:

A cet effet, nous allons étudier l'écoulement dans une conduite qui, partant d'un réservoir, se bifurque et se termine à deux réservoirs de niveau différent.

Conduite bifurquée alimentant deux réservoirs de niveau différent. — Un réservoir A alimente une conduite qui se bifurque en O et lance une branche vers un bassin M et l'autre branche vers le bassin N. Le niveau en M est à une hauteur

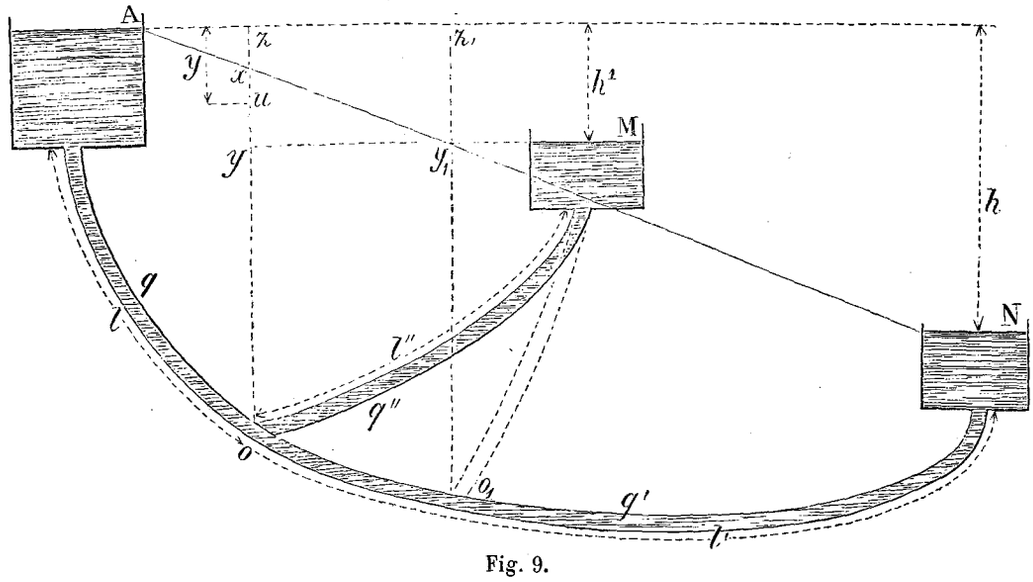

Fig. 9.

h' et le niveau en N à une hauteur h au-dessous du niveau dans le bassin A. Désignons par $l\ l'\ l''$ les longueurs des conduites AO, ON, OM et par $q\ q'\ q''$ leurs débits.

Supposons d'abord l'orifice M fermé, le réservoir A alimentera le bassin N et la ligne de charge sera représentée par la droite AN ; la charge disponible au point O aura donc pour mesure la verticale Ox.

Menons l'horizontale My du niveau d'eau dans le bassin M ; si le point y est au-dessous de x, il y a une charge représentée par xy entre O et M et l'écoulement se produit vers le bassin M ; si le point y se confond avec x, l'équilibre hydrostatique s'établit et l'eau reste stationnaire dans le bassin M, c'est ce qui

[1] Dans la pratique, ce n'est jamais la longueur absolue d'une conduite que l'on considère, mais tout simplement sa projection horizontale mesurée à l'échelle sur le plan de distribution ; les pentes sont toujours très-faibles et la longueur réelle diffère peu de la projection. S'il s'agissait d'un court branchement ascendant, il va sans dire qu'il faudrait prendre la longueur réelle du tuyau.

aura lieu lorsque le branchement O avancera sur la conduite jusqu'en O_1 ; si le point y est au-dessus de x, l'excès de charge existe dans le bassin M et l'écoulement se produit de M vers O, de sorte que le bassin M devient réservoir d'alimentation, c'est ce qui arrive si le branchement O s'éloigne encore du réservoir A et dépasse le point O_1.

Lorsque l'eau reste stationnaire, c'est-à-dire lorsque le branchement est en O_1, la perte de charge y_1z_1 depuis A est égale à h' et les triangles semblables donnent :

$$\frac{h'}{h}=\frac{l}{l+l'}$$

Quand xz sera moindre que $\frac{hl}{l+l'}$, l'écoulement se fera de O vers M

— plus grande — — M vers O.

Le sens de l'écoulement est indépendant de la longueur l'' de la conduite qui alimente le bassin M.

Nous admettons que les trois conduites ont le même diamètre, parce que, dans le cas où l'un des diamètres différerait, on chercherait une conduite équivalente ayant le diamètre voulu.

La formule $j=\frac{b_1q^2}{\pi^2r^5}$ donne la perte de charge par mètre courant pour une conduite à écoulement uniforme. Appliquant cette équation aux trois conduites simples AO, OM, ON, et désignant par y la perte de charge inconnue qui se produit entre le réservoir A et l'embranchement O il vient :

$$(1)\qquad y=\frac{b_1}{\pi^2}\frac{q^2l}{r^5}\quad h'-y=\frac{b_1}{\pi^2}\frac{q''^2l''}{r^5}\quad (h-y)=\frac{b^1}{\pi^2}\frac{q'^2l'}{r^5};$$

ajoutant ces équations deux à deux pour éliminer la hauteur inconnue uz ou y et exprimant que le débit q est la somme des débits q' et q'', on obtient les trois équations :

$$(2)\quad\begin{cases} h=\frac{b_1}{\pi^2r^5}(q^2l+q'^2l') \\ h'=\frac{b_1}{\pi^2r^5}(q^2l+q''^2l'') \\ q=q'+q''. \end{cases}$$

Ces trois équations résolues par tâtonnement nous donneront les valeurs de q q' et q''.

Si l'on tire les valeurs de q q' q'' des équations (1), et qu'on les porte dans la dernière des équations (2), celle-ci deviendra :

$$(3)\qquad \sqrt{\frac{y}{l}}=\sqrt{\frac{h'-y}{l'}}+\sqrt{\frac{h-y}{l''}}$$

c'est une équation du second degré facile à résoudre par rapport à y. Cette quantité étant connue, les équations (1) fourniront immédiatement les valeurs des trois débits.

Mais on peut transformer les équations (2) de manière à trouver une valeur approximative des débits :

A cet effet désignons par Q le débit de la conduite, l'orifice O étant fermé, c'est-à-dire le volume que le réservoir A enverrait au bassin N si le branchement n'existait pas, nous avons, d'après l'équation fondamentale, la relation :

$$Q^2 = \frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h}{l+l'} \tag{4}$$

Tirant de l'équation (4) la valeur de h et la portant dans la première des équations (2), nous trouvons :

$$Q^2 (l+l') = q^2 l + q'^2 l'$$

et, si nous remplaçons q par sa valeur $q'+q''$, nous aurons une équation du second degré qu résolue par rapport à q' donne, en adoptant la racine positive :

$$q' = -\frac{lq''}{l+l'} + \sqrt{Q^2 - \frac{q''^2 ll'}{(l+l')^2}}$$

La somme $(l+l')$ étant constante et égale à L, le maximum du produit ll' est égal à $\frac{L^2}{4}$ et le maximum de la fraction $\frac{ll'}{(l+l')^2}$ est égal à $\frac{1}{4}$.

En outre, on admet que le débit q'' est faible par rapport à Q, il est du reste toujours plus petit que Q ; on peut donc prendre d'une manière approximative

$$(5) \quad \begin{cases} q' = Q - \dfrac{lq''}{l+l'} \\ \text{et} \quad q = q'+q'' = Q + \dfrac{l'q''}{l+l'} \end{cases}$$

pour résoudre ces équations, il faudrait avoir la valeur du débit q''. Or, nous savons que la charge sur le branchement O est intermédiaire entre la charge Ox qui correspond au cas où le branchement est fermé et la charge Oy qui correspond au cas où l'équilibre hydrostatique s'établirait dans la branche OM. Le débit q est donc inférieur à $\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h'}{l}}$ et le débit q' est supérieur à $\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h-h'}{l'}}$, donc le débit q'' est inférieur à la quantité :

$$\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h'}{l}} - \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h-h'}{l'}}$$

Nous calculerons cette limite maxima du débit q'' et nous substituerons dans les égations (5) des nombres décroissant au-dessous de cette limite, nous obtiendrons les valeurs correspondantes de q et de q', et nous nous arrêterons lorsque ces valeurs seront telles que la relation $q = q'+q''$ se trouve vérifiée.

De l'équation (5) on tire un importante conséquence :

Lorsqu'on établit sur une conduite débitant un volume Q, *à son extrémité, une prise d'eau d'un volume* q", *le débit d'extrémité n'est pas réduit du volume* q", *mais de la moitié, du tiers, du quart... de ce volume suivant que l'orifice intermédiaire est pratiqué à la moitié, au tiers, au quart... de la conduite à partir du réservoir.*

Le débit de la conduite dans la partie qui précède l'orifice intermédiaire augmente donc de la moitié, des deux tiers, des trois quarts... du débit q''. Il va sans dire que ce débit q'' est relativement faible, par rapport au débit total d'extrémité Q; c'est seulement dans cette hypothèse que nous avons pu établir les équations (5).

Orifice alimenté par deux réservoirs. — Revenons maintenant à l'orifice O (*fig.* 8) alimenté par les deux réservoirs A et B. Le robinet O étant peu ouvert de manière à livrer passage à un faible débit q_1, il n'arrivera plus au réservoir B, d'après l'équation (5), qu'un volume :

$$q' = q - \frac{lq_1}{l+l'}$$

tandis que, le robinet *o* étant fermé, il arrivait en B, un volume;

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1}\,\frac{h}{l+l'}}$$

La ligne de charge qui était d'abord la droite AB devient une ligne brisée A*u*B.

A mesure que le débit q_1 augmente, la charge disponible O*u* s'abaisse et elle atteint l'horizontale B*y* du réservoir B, lorsque le débit q_1 devient égal à

$$\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1}\cdot\frac{h}{l}} \quad \text{ou à} \quad q\sqrt{\frac{l+l'}{l}}$$

quantité que nous représenterons par A; à ce moment l'équilibre hydrostatique s'établit entre l'orifice O et le réservoir B.

Enfin, lorsque le débit q_1 dépasse la valeur précédente, le sommet de la colonne piézométrique en O descend au-dessous de l'horizontale du bassin B et vient en *z*, de sorte que les deux réservoirs A et B concourent à l'alimentation de l'orifice O.

L'orifice étant complétement ouvert, la charge est nulle sur cet orifice et le débit atteint son maximum. A gauche de l'orifice O, c'est le réservoir A qui alimente la conduite et qui produit sur l'orifice une charge égale à H, il y a donc entre cette charge et le débit correspondant la relation :

$$\mathrm{H} = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} q^2 l.$$

A droite, c'est le réservoir B qui alimente la conduite et qui produit sur l'orifice une charge égale à $\mathrm{H} - h$, il y a donc entre cette charge et le débit correspondant la relation :

$$(\mathrm{H} - h) = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} q'^2 l'$$

Ces deux équations nous permettent de calculer les débits q et q' et par conséquent le débit total de l'orifice qui est la somme des deux précédents.

Les deux volumes q et q' envoyés par les bassins à l'orifice seront égaux lorsque l'orifice O partagera la longueur horizontale $l+l'$ dans le rapport des charges H et $(\mathrm{H} - h)$.

On pourra chercher aussi en quel point il conviendrait de placer l'orifice O pour obtenir le débit maximum $q+q'$; en égalant à zéro la dérivée de cette somme et désignant par a la distance $(l+l')$ qui sépare les deux réservoirs, on trouve l'équation

$$\frac{\sqrt{H-h}}{\sqrt{(a-l)^5}} - \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{l^5}} = 0$$

qui, résolue par rapport à l, donnera la position de l'orifice de débit maximum. Cette question ne présente, du reste, pas d'utilité pratique et pourrait être assez rapidement résolue par tâtonnement.

Conduite alimentée par deux réservoirs. — Nous venons d'étudier l'écoulement par un large orifice qu'alimentent deux réservoirs. Nous allons considérer maintenant une conduite avec service de route, alimentée par deux réservoirs A et B.

Utilité d'un second réservoir. — Dans les distributions ordinaires, dit Dupuit, le débit des conduites n'est pas régulier; nul ou très-faible la nuit, il est variable pendant le jour, suivant les heures; par conséquent, le diamètre des conduites doit être tel qu'il satisfasse aux besoins dans le moment de leur plus grande exigence; on en conclut qu'il est possible de profiter des intermittences de la distribution pour alimenter des réservoirs d'extrémité ou intermédiaires, réservoirs qui fourniront à la consommation dans les moments où elle est la plus considérable. Il peut même résulter de cette disposition une augmentation sensible de la charge disponible. La ville de Paris offre un exemple de ce système de distribution. L'eau de l'Ourcq, amenée au bassin de la Villette au nord de Paris, traverse la vallée de la Seine dans des conduites qui se terminent sur la rive

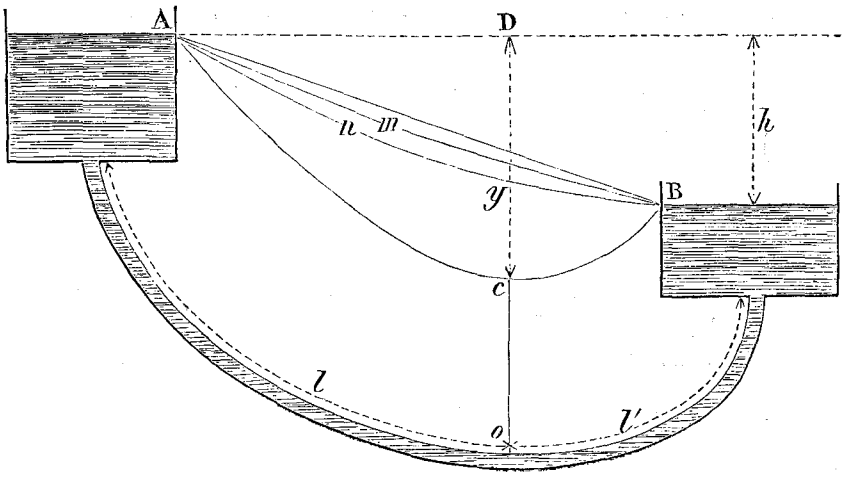

Fig. 10.

opposée par des réservoirs. La nuit, les conduites ne fournissant que peu d'eau en route, remplissent les réservoirs extrêmes, de manière que, pendant le jour, les conduites alimentées des deux côtés peuvent fournir à une consommation beaucoup plus considérable que si elles ne l'étaient que d'un seul.

Calcul de l'alimentation par deux réservoirs. — La figure 10 représente la conduite qui réunit les deux réservoirs A et B dont la différence de niveau est h.

S'il n'existait point de service de route, le réservoir A enverrait dans le ré-

servoir B une quantité d'eau

$$Q' = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}}$$

et la ligne de charge serait la droite AB. Mais, il existe un service de route, dont le cube total est Q_1 et un service d'extrémité P.

Et l'on a, entre les trois débits Q', Q_1 et P la relation suivante

$$(1) \qquad Q'^2 = P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2 ;$$

c'est l'équation (6 *bis*) que nous avons démontrée à la page 31.

L'équation (1) est du second degré par rapport à P et donne :

$$(2) \qquad P = \sqrt{Q'^2 - \frac{1}{12} Q^2} - \frac{1}{2} Q$$

et la ligne de charge est une parabole du 3e degré (A*m*B) qui n'est point tangente à l'horizontale en B.

Le second membre de l'équation (2) s'annule lorsque

$$Q = Q'\sqrt{3} = 1{,}73.Q' ;$$

à ce moment le débit d'extrémité est nul et le réservoir inférieur B cesse d'être alimenté.

Lorsque Q dépasse $Q'\sqrt{3}$, le débit d'extrémité devient négatif, c'est-à-dire que le bassin B devient lui-même réservoir d'alimentation de la conduite sur une certaine longueur : la ligne de charge prend la forme parabolique ACB.

Appelons L la longueur totale de la conduite,
— l la longueur alimentée par le réservoir A
— l' — — B
— o le point de partage entre l et l'
— y la perte de charge CD entre le réservoir A et le point O.

Si nous nous reportons à l'équation (5) de la page 30 qui exprime la relation entre la charge, le rayon d'une conduite, son service de route $\frac{Q}{l}$ par mètre courant et la distance x qui sépare du réservoir le point de la conduite considérée, nous aurons les relations suivantes :

(3) Pour la conduite AO. . . . . $y = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{Q^2}{L^2} \cdot \frac{l^3}{3}$

(4) Et pour la conduite BO. . . . . $(y - h) = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{Q^2}{L^2} \cdot \frac{l'^3}{3}$

(5) A ces deux équations il faut ajouter $L = l + l'$.

Nous avons donc trois relations entre les sept variables Y, Q, R, L, l, l', h et quatre de ces variables étant données on pourra déterminer les trois autres.

Supposons que les inconnues soient l, l' et r ; résolvons les deux équations (3)

et (4) par rapport à l et l', et prenons le rapport de ces deux quantités, nous trouvons

$$\frac{l}{l'}=\frac{\sqrt[5]{y}}{\sqrt[5]{y-h}}\text{ ; d'où }\quad l=\mathrm{L}\frac{\sqrt[5]{y}}{\sqrt[5]{y}+\sqrt[5]{y-h}}\quad l'=\mathrm{L}\frac{\sqrt[5]{y-h}}{\sqrt[5]{y}+\sqrt[5]{y-h}}$$

quant au rayon r, on le tirera de l'équation (3) qui ne renferme plus que lui comme inconnue.

Lorsque la différence de niveau entre le réservoir A et les points bas de la conduite est très-grande par rapport à h, il en est de même de la perte de charge y, l et l' se rapprochent de $\frac{\mathrm{L}}{2}$ et le point de passage dans l'alimentation se trouve vers le milieu de la conduite.

Généralement, outre les trois inconnues précédentes : le rayon et les deux longueurs l et l', il existe une quatrième inconnue c'est la charge y. On la déterminera par tâtonnement de la manière suivante :

On se donnera plusieurs valeurs de y et on en déduira les valeurs correspondantes de $(l+l')$; on construira une courbe ayant pour abscisses y et pour ordonnées $(l+l')$; le point où cette courbe rencontre la parallèle à l'axe des abscisses menée à la hauteur L au-dessus de cet axe a précisément pour abscisse la valeur cherchée de y puisqu'à cette valeur correspond $l+l'=\mathrm{L}$.

Il va sans dire que la courbe en question ne se trace que d'une manière approximative et que quatre ou cinq points suffisent pour la déterminer.

Cette manière d'opérer deviendra plus claire par les applications que nous en ferons ultérieurement.

Ainsi, le réservoir B est un auxiliaire puissant de l'alimentation ; il emmagasine à chaque instant l'excès de liquide fourni par le réservoir A, et il lui vient en aide dans les moments où la dépense de route prend un accroissement accidentel ; il permet de réduire considérablement le diamètre des conduites maîtresses et par suite le prix de revient. Mais, il faut prendre garde que le diamètre de la conduite maîtresse ne soit pas réduit outre mesure ; il faut qu'elle puisse, pendant le chômage du service de route, réparer toutes les pertes qu'a subies le bassin B, pendant le temps où il concourait à l'alimentation ; c'est un point important dont il faut s'assurer par le calcul.

Le régime de la distribution a une grande influence sur les diamètres des conduites ; plus ce régime est variable, plus la dépense d'eau est irrégulière, plus il faut augmenter le diamètre ; le même débit, réparti régulièrement sur les vingt-quatre heures de la journée, exige le diamètre minimum. Il faut donc éviter autant que possible la production simultanée de toutes les causes de dépense qui se rencontrent sur le parcours de la conduite.

Conduite à plusieurs réservoirs. — Le calcul d'une conduite alimentée par plusieurs réservoirs échelonnés sur son parcours n'est pas plus difficile que le précédent : on traite séparément la section comprise entre le premier et le deuxième réservoir, puis la section comprise entre le deuxième et le troisième, et ainsi de suite. L'usage de ces réservoirs assure l'alimentation et permet d'abaisser singulièrement le diamètre des conduites. Cependant, il faut se rappeler une remarque importante ; le diamètre de la conduite qui va du premier au deuxième réservoir, doit être assez grand, non-seulement pour réparer les pertes subies par le second réservoir, lorsqu'il concourt à l'alimentation de la première section, mais encore pour emmagasiner tout le liquide nécessaire à la

consommation des sections suivantes. Il en est de même pour les autres réservoirs; chacun d'eux doit emmagasiner le cube nécessaire à tous ceux qui le suivent. Cette condition ne permet pas de réduire autant qu'on le voudrait le diamètre des conduites.

Influence prépondérante du diamètre des conduites. — C'est le diamètre des conduites qui exerce sur leur débit une influence considérable; on s'en rend compte à la seule inspection des formules. A moins de circonstances spéciales, il est inutile de faire de grandes dépenses pour augmenter la charge ou pour diminuer la longueur d'une conduite; en effet, le débit ne varie que proportionnellement à la racine carrée de l'augmentation de charge, ou à la diminution de longueur. L'influence du diamètre sur le débit est cinq fois plus importante, puisque ce débit est proportionnel à la puissance $\frac{5}{2}$ du diamètre. C'est la dimension qui joue le principal rôle.

Dupuit fait remarquer que : 1° si une conduite débite 100 litres, en doublant la charge elle en débitera 140, en la quadruplant elle en débitera 200; en doublant le diamètre elle débitera 560 litres, en le quadruplant 3200 litres; 2° l'influence du diamètre sur la perte de charge est encore plus considérable, puisqu'elle est proportionnelle à la puissance cinquième du diamètre; en doublant le diamètre, le produit est à peine sextuple, tandis que la perte de charge devient 32 fois plus petite.

DES ORIFICES QUI TERMINENT LES CONDUITES

Les formules relatives à l'écoulement de l'eau dans les conduites supposent que l'orifice terminal est la section même de la conduite, que celle-ci débouche directement dans l'atmosphère ou dans un réservoir. C'est, en effet, cette hypothèse qu'il faut adopter, puisque c'est elle qui correspond au débit maximum en vue duquel la conduite est faite; mais, dans la pratique, l'hypothèse de l'écoulement à pleine section ne se trouve qu'accidentellement réalisée; l'orifice terminal est étranglé au moyen d'un robinet, qui permet de proportionner le débit aux besoins du moment; la section réelle d'écoulement ne peut donc être déterminée; il serait difficile, fait remarquer Dupuit, de connaître sa grandeur par des mesures directes, grandeur qui serait encore à corriger par des coefficients de contraction, aujourd'hui complétement inconnus. De sorte qu'on règle expérimentalement l'ouverture des orifices pour avoir un certain débit; il y a alors une inconnue dans le problème, c'est la charge disponible sur le robinet ou la hauteur à laquelle l'eau pourrait jaillir par un orifice vertical.

Les pertes de charge que nous avons calculées et les lignes de charge, que nous avons construites, ne s'appliquent donc qu'au cas de l'écoulement à gueule bée par un orifice terminal; elles se trouvent modifiées, dans le cas où le courant est étranglé par un robinet; dans la pratique, les modifications résultant de cet étranglement ne sont jamais dangereuses, puisqu'elles ont toujours pour effet d'augmenter la charge disponible à l'amont du robinet. Tous les orifices de sujétion continuent donc à être desservis d'une manière certaine; la conduite joue en partie le rôle de réservoir, son diamètre est trop fort pour le débit momentané qu'on lui demande, mais il n'y a pas de mal à cela et il y aurait, au contraire, inconvénient à ce que la conduite ne pût satisfaire à un maximum accidentel de débit.

JETS D'EAU

C'est sur la variation de la charge avec l'étranglement de l'orifice terminal que sont fondés les jets d'eau.

Considérons un réservoir A alimentant une conduite, qui se termine au point C par un orifice dont l'axe est vertical.

Supposons d'abord qu'on place au-dessus de cet orifice un tube élevé, l'eau

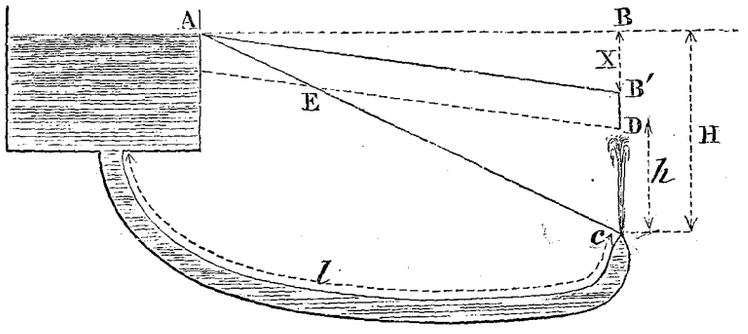

Fig. 11.

y montera jusqu'à ce qu'elle atteigne le niveau B du réservoir, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique s'établisse. La charge sur l'orifice C est représentée par la colonne CB.

Supposons maintenant que l'on recouvre l'orifice C d'un ajutage conique, terminé en pointe, de manière à ne laisser sortir l'eau que par un orifice de section incomparablement moindre que celle de la conduite ; la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite sera très-faible et égale à u, les frottements détermineront une perte de charge :

$$X = jl = \frac{b_1 u^2 . l}{r}$$

Soit ($BB' = X$) ; prenons en outre, au-dessous de B′ une hauteur B′D, égale à $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, cette hauteur représente la perte de charge due à la destruction de la vitesse de la masse liquide, qui vient choquer l'ajutage conique.

Il ne reste donc, comme charge disponible sur l'orifice, qu'une hauteur CD, et la ligne de charge est la parallèle DE à B′A.

Le jet d'eau, qui s'échappera de l'ajutage conique, ne s'élèvera donc qu'à une hauteur h, donnée par l'équation :

$$h = H - \frac{b_1 u^2 l}{r} - \frac{u^2}{2g} \qquad (1)$$

Généralement, la vitesse u est faible et on néglige le dernier terme du second membre, cela revient à considérer la hauteur CB′, comme charge disponible, et à adopter B′A, comme ligne de charge.

Si l'ouverture de l'ajutage conique va en augmentant, la dépense augmente et avec elle la vitesse u, de sorte que les pertes de charge, à retrancher de H,

augmentent rapidement ; la charge disponible h diminue et il en est de même de la hauteur du jet d'eau.

Enfin, lorsque l'ajutage n'est plus que le prolongement de la section, la hauteur h devient nulle ; l'eau qui s'échappe de la conduite n'est animée que de la vitesse u, et le jet ne s'élève qu'à la hauteur $\frac{u^2}{2g}$, c'est-à-dire à une hauteur généralement très-faible. Alors la ligne de charge est représentée, comme nous savons, par la droite AC.

En réalité, la vitesse u n'est pas complétement absorbée par la contraction due à l'ajutage, et il ne faudrait retrancher dans le second membre de l'équation (1) qu'une quantité $\alpha \frac{u^2}{2g}$, dans laquelle α est un coefficient moindre que l'unité ; mais il est plus simple de ne pas tenir compte de ce terme, généralement peu important dans les conduites disposées spécialement pour l'alimentation de jets d'eau.

La hauteur h du jet d'eau, déduite de l'équation (1), est un peu trop forte ; elle se trouve atténuée dans la réalité par la résistance de l'air et aussi par le choc des molécules liquides qui retombent.

D'Aubuisson, d'après ses expèriences, avait conclu que la hauteur réelle h' du jet d'eau était donnée par la formule :

$$h' = h - 0{,}01.h^2 \qquad (2)$$

Darcy a repris les expériences relatives à cet objet : il a montré que le coefficient de réduction de la valeur théorique h se rapprochait de l'unité, à mesure que le diamètre du jet augmentait :

Ainsi, pour un orifice de $0^m{,}015$ de diamètre, on avait. . . $h' = 0{,}93.h$
Et pour un orifice de $0^m{,}05$. . . . . $h' = 0{,}95.h$

Le coefficient de réduction par lequel il faut multiplier la hauteur piezométrique, pour avoir celle du jet, n'est donc point constant ; il est probable qu'il varie, non-seulement avec le diamètre de l'ajutage, mais encore avec le diamètre de la conduite alimentaire.

Pour des orifices très-petits avec des charges considérables, le coefficient de réduction serait encore inférieur aux nombres précédents.

La hauteur d'un jet d'eau est du reste soumise, comme les lignes de charge, à des oscillations continuelles ; dans les expériences de Darcy, la hauteur moyenne n'a été que les 0,96 de la hauteur maxima calculée par les formules précédentes.

INFLUENCE DU PROFIL EN LONG D'UNE CONDUITE SUR SON DÉBIT

Dans tout ce qui précède, nous n'avons point parlé du profil en long des conduites ; il était inutile de le faire, car, du moment que l'écoulement a lieu à pleine section, la résistance ne dépend que de la longueur et du diamètre.

La direction en plan a bien son influence sur le débit, mais elle est sans importance, ainsi que nous l'avons dit en parlant des coudes.

L'influence du profil en long n'est pas appréciable non plus, lorsque ce profil est peu accidenté; cependant, elle se fait sentir dans certains cas, et il importe d'avoir sur elle des notions précises.

On a toujours recommandé, dit Darcy, de poser, autant que possible, les conduites de telle façon qu'elles ne présentent aucun point haut, depuis leur suture au bassin alimentaire jusqu'au point de dégorgement; en effet, ces points hauts, qui se trouvent à l'intersection des pentes de signe contraire, favorisent d'abord l'emprisonnement de l'air lorsqu'on met les conduites en charge et, en second lieu, l'accumulation de celui que l'eau tient en suspension.

Ces obstacles diminuent donc la section du tuyau dont le débit, dès lors, est inférieur à celui donné par les formules. On les fait disparaître au moyen de robinets à air, ou par des tuyaux ouverts implantés sur la conduite et suffisamment élevés, ou, enfin, par des soupapes et ventouses à flotteur convenablement disposés. Mais ces appareils, utiles en général, produiraient un effet contraire à celui qu'on attend d'eux dans une infinité de circonstances.

Il existe certains profils qui, s'ils étaient adoptés pour la pose d'une conduite, rendraient impossible le dégagement de l'air accumulé dans les points hauts, attendu que l'air extérieur entrerait par les robinets, les tuyaux ouverts, les soupapes et les ventouses, et modifierait ainsi complétement les conditions de l'écoulement. Dans ces profils, il convient d'éviter absolument les pentes et les contre-pentes. On verra de plus qu'il faut éviter à tout prix ces profils, car le débit qui les accompagnerait, lors même qu'ils seraient tracés suivant des pentes se succédant toujours avec le même signe, serait soumis aux variations que l'introduction de l'air cause à l'écoulement des liquides dans les siphons.

Influence de la pente d'une conduite sur les pressions intérieures. — 1er *Cas, où la pression intérieure est supérieure à la pression atmosphérique.* — Considérons un réservoir figure 12, alimentant une conduite horizontale de longueur L, et soit H la hauteur d'eau dans le réservoir au-dessus de la naissance de la conduite. La vitesse d'écoulement dans le tuyau est u et la hauteur génératrice de cette vitesse est $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, de sorte qu'entre la surface *aa* de l'eau dans le réservoir et l'extrémité *c* de la conduite, la charge H est absorbée : 1° par les frottements; 2° par la production de la vitesse u.

Négligeons la perte de charge due à la contraction, à l'entrée du tuyau, et considérons seulement celle qu'engendre le frottement sur les parois; cette perte de charge est proportionnelle à la longueur parcourue.

Prenons une hauteur *ad* égale à $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$; ce qui restera de la charge H, c'est-à-dire la hauteur *db*, représentera la charge totale absorbée par les frottements de l'origine à l'extrémité de la conduite. Menons la droite *dc*, ce sera la ligne des niveaux piézométriques; en un point quelconque *e* de la conduite, la hauteur piézométrique est *ef*, elle mesure le frottement qui reste à vaincre pour que le liquide passe de *e* en *c*, et cette hauteur piézométrique h est donnée par l'équation :

$$h = \left(\mathrm{H} - \frac{u^2}{2g}\right)\frac{\mathrm{L}-l}{\mathrm{L}}$$

Cette valeur de h mesure la pression effective, résultant de la pression atmosphérique et de la pression de l'eau; dans le cas d'une horizontale, cette pression est toujours positive, elle diminue à mesure qu'on s'avance vers l'extrémité où elle s'annule; dans tout le parcours, la pression effective du liquide est

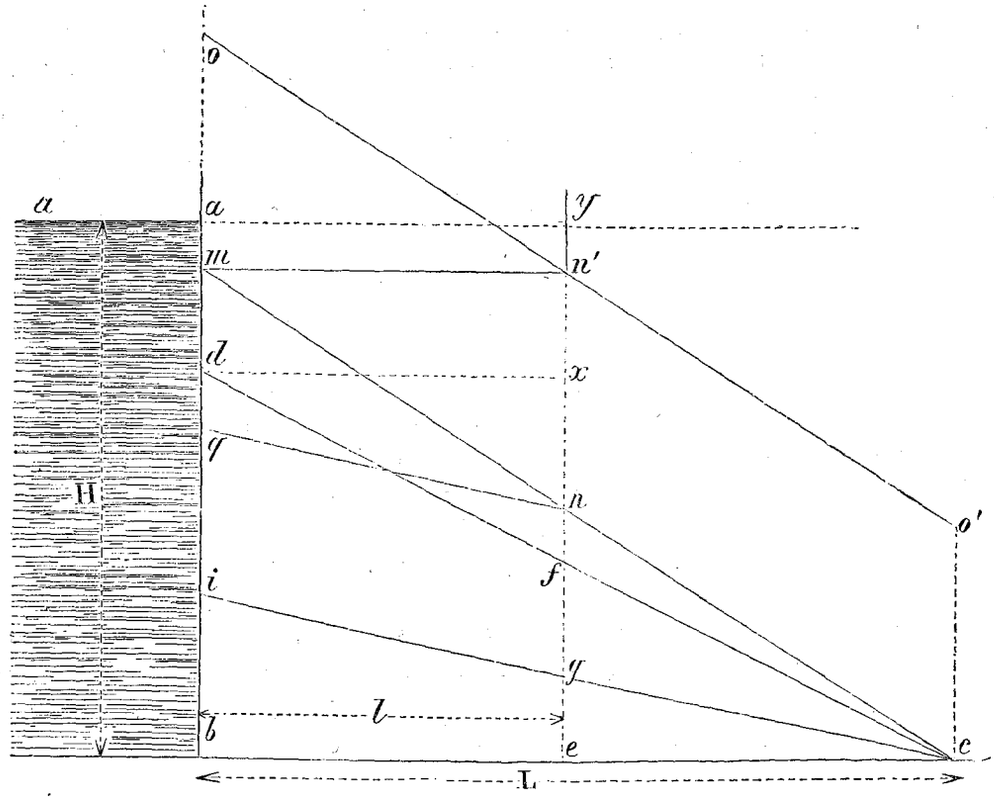

Fig. 12.

dirigée de l'intérieur à l'extérieur du tuyau et, si on en perce les parois, l'eau en sortira toujours sans que l'air extérieur tende à rentrer.

2e *Cas, où la pression intérieure est égale à la pression atmosphérique.* — Considérons, au lieu d'une conduite horizontale, une conduite inclinée précisément suivant la ligne dc, c'est-à-dire telle que $\left(H = \frac{u_2}{2g}\right)$, la hauteur piézométrique sera nulle en un point quelconque de cette conduite, c'est-à-dire que la pression atmosphérique s'exercera aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, et, si on perce les parois en un point quelconque, l'eau ne tendra pas à sortir ni l'air extérieur à rentrer; c'est là un fait facile à vérifier par l'expérience.

Nous admettons toujours que la longueur de la conduite se confond avec la longueur de sa projection horizontale, quelle que soit l'inclinaison; cette hypothèse est, en général, parfaitement fondée, car les pentes n'ont jamais une valeur absolue considérable, et, si l'on considère une ligne inclinée d'$\frac{1}{10}$, sa longueur est égale à celle de sa projection horizontale multipliée par 1,005; la différence est donc insensible dans la pratique.

Si donc nous considérons la conduite de longueur L, inclinée suivant la ligne dc, la vitesse de l'eau restera la même que dans la conduite horizontale, car cette vitesse ne dépend que de la longueur de la conduite et de la différence entre le niveau du réservoir et l'orifice extrême c; la hauteur piézométrique est nulle dans tout le développement de la conduite dc, et l'eau trouve dans la pente

qu'elle parcourt les mêmes ressources, pour vaincre les frottements, que celles qui résultaient des diminutions progressives de hauteur des colonnes piézométriques, dans le cas de l'écoulement par le tuyau horizontal. On voit, en effet, que la différence de niveau entre deux points quelconques de la conduite inclinée, est précisément égale à la différence de hauteur des deux colonnes piézométriques correspondantes de la conduite horizontale.

Si l'on donne la conduite *ic* intermédiaire entre *dc* et l'horizontale *bc*, la hauteur piézométrique en un point quelconque sera positive et mesurée par la verticale *gf*, et cette hauteur, augmentée de la différence de niveau existant entre le point considéré et l'extrémité du tuyau, sera précisément égale à la hauteur piézométrique correspondante de la conduite horizontale; par conséquent, les frottements seront pareillement surmontés.

Dans les trois cas que nous venons d'examiner, la vitesse d'écoulement et le débit sont les mêmes : le travail destiné à vaincre les frottements est produit, soit par la pente même de la conduite, soit par la variation des hauteurs piézométriques.

Il est facile de calculer l'inclinaison *dc*, suivant laquelle la pression à l'intérieur du tuyau est constamment égale à la pression atmosphérique : désignons par A la différence de niveau entre le réservoir et l'extrémité de la conduite, la pente de la conduite *dc* sera égale à :

$$(1) \qquad \frac{A - \frac{u^2}{2g}}{L}$$

D'un autre côté, nous avons

$$rj = b_1 u^2 \quad \text{ou} \quad rjL = b_1 L.u^2$$

La quantité jL représente la charge totale A, et l'équation précédente nous conduit à

$$\frac{rA}{b_1 L} = u^2$$

ce qui nous permet de mettre l'expression de la pente sous la forme

$$A.\ \frac{1 - \frac{r}{2g.b_1 L}}{L}$$

Connaissant par les tables la valeur du coefficient b_1, nous calculerons facilement l'expression précédente, qui, du reste, diffère généralement peu de $\left(\frac{A}{L}\right)$, car la hauteur due à la vitesse u est faible relativement à la hauteur totale de chute A.

3° *Cas où la pression intérieure est moindre que la pression atmosphérique.* — Considérons maintenant une conduite *mc* plus inclinée que *dc*; la charge consommée par le frottement sur la longueur *mn* est la même que celle qui était consommée sur la longueur égale *df* (ne pas oublier que les longueurs sont toujours confondues avec leurs projections horizontales); or, sur la longueur *df* la charge absorbée par les frottements était de *fx*; donc elle est aussi mesurée par

fx pour la longueur *mn*, et comme la charge fournie par la pesanteur n'est que de *nx* puisque la production de la vitesse *u* absorbe la hauteur *xy*, le complément, soit *nf*, doit être représenté par une diminution de pression à l'intérieur de la conduite.

La pression, au point *n* de la conduite, est donc inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité représentée par la verticale comprise entre la direction considérée *mc* et la direction *dc* qui correspond au cas où la pression intérieure est constamment égale à la pression atmosphérique.

Si l'on vient à percer la conduite au point *n* et à la surmonter d'un tube piézométrique, non-seulement l'eau ne s'élèvera pas dans le tube, mais la pression extérieure l'emportant sur la pression intérieure, c'est l'air qui pénétrera dans la conduite, et l'écoulement à pleine section ne pourra plus subsister.

Le raisonnement précédent suppose que l'écoulement à plein tuyau existe dans la conduite *mc*, et il reste à montrer comment on réalisera cette hypothèse dans la pratique.

Considérons d'abord le tuyau horizontal *bc*; lorsque l'eau y pénètre, elle le fait avec la vitesse due à toute la charge disponible, cette vitesse se ralentit par suite des frottements à mesure que l'eau s'avance vers l'extrémité du tuyau, les couches liquides successives se trouvent continuellement retardées, non-seulement elles ne tendent pas à se séparer les unes des autres, mais elles se pressent même, et l'écoulement à pleine section s'établit nécessairement.

L'eau qui pénètre dans le tuyau *dc* trouve toujours en passant d'une section à l'autre la pente nécessaire pour vaincre les frottements, la vitesse est partout la même; aucune tranche liquide ne marche plus vite que l'autre et ne tend à se séparer de sa voisine; la continuité de l'écoulement à pleine section est donc réalisée, mais cette continuité est sur le point de disparaître.

Pour toutes les inclinaisons comprises entre l'horizontale et *dc*, le ralentissement de vitesse a lieu depuis le réservoir jusqu'à l'orifice de la conduite, et l'écoulement à pleine section ne peut manquer de se produire.

Considérons maintenant la conduite *mc* plus inclinée que *dc*, l'eau qui y pénètre avec une certaine vitesse trouve une pente supérieure à celle qui est nécessaire pour vaincre les frottements, elle prend donc un accroissement de vitesse qui se traduit par une diminution de la section d'écoulement; le tuyau n'est plus rempli, et l'eau s'y écoule comme elle le ferait dans un canal cylindrique découvert.

Dans une conduite brisée, telle que *qnc*, n'ayant qu'une partie de sa longueur au-dessus de *dc*, l'écoulement à pleine section pourrait se produire de *q* en *n*, mais la vitesse en *n* serait toujours moindre que *u*, cette vitesse irait en augmentant de *n* en *c*, et l'écoulement à pleine section ne saurait se produire.

On voit donc que les conduites dont certaines parties dépassent la ligne *dc* diffèrent essentiellement de celles placées au-dessous de la même ligne, non-seulement en ce qui concerne les différences de pression supportées par les parois intérieures des tuyaux, mais encore en ce qui touche l'écoulement du fluide.

Il n'est cependant pas impossible de faire couler à pleine section les tuyaux, qui coulent à section incomplète lorsque l'eau s'y introduit d'une manière progressive. Il faut les fermer à leur extrémité inférieure lorsqu'on les met en charge, attendre que tout l'air en soit sorti, soit à l'aide de robinets, soit par l'extrémité supérieure, puis enfin, lorsqu'on ouvre le robinet qui fermait la partie inférieure, l'eau coule en vertu de toute la charge, et donne un volume égal à celui

que les formules indiquent. Aucune tranche liquide ne peut se séparer des tranches voisines, et un mouvement commun s'établit.

Une conduite, dont le profil dépasserait sur une partie de sa longueur la limite *dc*, ne doit avoir aucun point haut dans cette partie. On ne pourrait en effet recourir aux ventouses, tubes ouverts ou robinets, pour faire sortir l'air emprisonné dans les tubes, puisque ces appareils n'auraient pour résultat que d'introduire de l'air nouveau dans la conduite. Le profil d'une pareille conduite doit être assujetti à cette condition rigoureuse d'avoir toutes ses pentes se succédant avec le même signe. Et remarquons d'ailleurs, à l'appui de cette observation, que dans une pareille conduite, les parois étant pressées avec un poids inférieur à celui de l'atmosphère, l'air en dissolution dans l'eau se dégagerait avec une facilité plus grande que dans les conduites ordinaires. Sous le rapport hygiénique, ce dégagement d'air est encore chose fâcheuse. On sait que l'eau est beaucoup plus salubre lorsqu'elle tient une certaine quantité d'air en suspension, et qu'on a même recommandé souvent de placer de temps en temps des chutes dans les aqueducs, afin de favoriser l'accroissement du volume d'air que l'eau peut retenir à la pression atmosphérique.

4° *Cas où la pression intérieure peut être nulle ou négative.* — Nous avons vu que, pour une conduite dirigée suivant *mc*, la pression au point *n* était inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité mesurée par la hauteur *nf*; si le point *n* s'élève jusqu'à venir en *n'* à une distance telle au-dessus de *cd* que *n'f* représente la pression atmosphérique, la pression sera nulle au point *n'* dans une conduite telle que *mn'c*, le liquide s'écoulera en *n'* en vertu d'une charge égale à la somme de la pression atmosphérique et de la charge due à la différence de niveau entre *a* et *n'*; l'écoulement sera le même que si la conduite était sciée en *n'* et débouchait dans le vide; on aura beau allonger la branche descendante *n'c*, le débit restera invariable. Il en sera de même pour toutes les conduites ayant un de leurs points sur la ligne *oo'* parallèle à *dc* et située au-dessus d'elle à une distance verticale égale à la hauteur de la colonne liquide qui mesure la pression atmosphérique.

Si une conduite avait un de ses points au-dessus de la ligne *oo'*, la pression en ce point deviendrait négative, et en remontant vers le réservoir, on trouverait encore la pression nulle au point où la conduite coupe la ligne *oo'*; l'écoulement serait analogue à celui du cas précédent.

Ces considérations, plus théoriques que pratiques, ont cependant leur intérêt et peuvent trouver leur application notamment dans la question du siphon.

Dans la réalité, l'écoulement ne pourra persister avec une pression nulle ou négative; si l'extrémité *c* de la conduite débouche en plein air, l'air pénètre dans le tuyau et l'écoulement ne se fait plus à pleine section, la conduite se transforme en une sorte de rigole; si l'extrémité de la conduite plonge dans un réservoir, l'air extérieur ne remonte plus dans le tuyau, mais l'air dissous dans l'eau s'en dégage sous l'influence de la diminution de pression, il s'accumule dans la partie haute de la conduite et finit par arrêter l'écoulement.

Résumé. — Voici le résumé de l'étude précédente :

1° Les conduites sur les parois intérieures desquelles s'exercent des pressions plus grandes que l'atmosphère ne sont sujettes à aucun inconvénient; elles peuvent même avoir des points hauts, attendu qu'il est possible de faire dégager l'air retenu dans ces parties.

2° Les conduites à pressions plus petites que l'atmosphère sont sujettes à des intermittences causées par le dégagement de l'air; elles ne coulent qu'à la ma-

nière des siphons et ne peuvent être mises en charge que par le procédé employé pour ces appareils; de plus, dans leur tracé il faut exclure tous les points hauts, puisque ni robinets, ni tuyaux, ni ventouses ne peuvent être appliqués sur leurs parois; enfin le dégagement d'air auquel elles donnent continuellement naissance rend l'eau qu'elles conduisent moins salubre pour les populations qu'elles sont destinées à alimenter.

3° Les conduites à pressions négatives modifient radicalement les conditions de l'écoulement, puisque la pression négative n'arrive que parce que la pose topographique de la conduite met celle-ci dans l'impossibilité de satisfaire aux résultats déduits des formules.

4° Les conduites à pressions égales à l'atmosphère ou à pressions nulles forment la limite : d'une part entre les conduites à pressions plus petites et plus grandes que l'atmosphère ; d'autre part entre les conduites à pressions plus petites que l'atmosphère et à pressions négatives. Elles présentent évidemment elles-mêmes les inconvénients qui s'attachent aux conduites dont elles forment la limite inférieure ; il convient donc, dans tout projet de distribution d'eau, de chercher à établir les conduites de telle façon que leurs parois aient toujours à résister à des pressions plus grandes que l'atmosphère. Dans le cas où l'on serait exposé à rencontrer des pressions inférieures à la pression atmosphérique en quelque point du parcours, il y aura lieu d'examiner s'il ne serait pas possible sur une partie de la longueur de remplacer le tuyau par une rigole découverte.

Influence exercée par l'air confiné sur le débit d'une conduite. — L'influence exercée sur le débit d'une conduite par l'air, qui se dégage de l'eau et qui s'accumule dans les parties hautes du tuyau, a été reconnue depuis longtemps. Couplet l'a constatée sur une conduite amenant l'eau de Roquencourt à Versailles, et voici l'explication qu'en donna l'Académie des sciences :

« M. Couplet a vu qu'en lâchant l'eau à l'embouchure d'une conduite, il se passait près de dix jours avant qu'il en parût une goutte à son bout de sortie. Cet accident, si bizarre en apparence, venait, selon l'explication de M. Couplet, d'un air cantonné dans la partie supérieure de certains coudes de la conduite élevés sur l'horizon. Une eau qui se présentait pour passer tendait à forcer cet air dans son retranchement et à le pousser en avant; mais une autre eau déjà passée avant que l'air se fût amassé dans le haut du coude le soutenait, et si elle se trouvait être à la même hauteur verticale que celle qui tendait à pousser en avant, il se faisait un équilibre et un repos que l'on voit bien qui pouvait durer longtemps. On remédia à cet inconvénient en adoucissant quelques coudes de la conduite et en mettant aux angles les plus élevés des ventouses où l'air pouvait se retirer sans nuire au cours de l'eau. Après cela, l'eau venait au bout de douze heures, précédée de bouffées de vents, de flocons d'air et d'eau, de filets d'eau interrompus, et tout cela prenait presque la moitié des douze heures d'attente. »

Dans son architecture hydraulique, Belidor démontra la nécessité de placer des ventouses ou des robinets :

1° Pour empêcher la rupture des tuyaux en faisant évacuer l'air qui s'opposait au mouvement du fluide ;

2° Pour permettre au volume débité d'arriver au maximum, ce qui ne pouvait avoir lieu tant qu'il restait de l'air dans les tubes.

Le seul remède que tous les auteurs aient conseillé et que les praticiens aient adopté, pour combattre les effets de l'air emprisonné dans les conduites d'eau, a été de placer, dans les points hauts de ces conduites, des soupapes chargées d'un poids et analogues à celles des chaudières de machines à vapeur, des tuyaux

verticaux implantés sur la conduite et s'élevant à une hauteur suffisante pour qu'il n'y ait pas déversement, des robinets ou des ventouses à flotteurs telles que celles qu'on emploie aujourd'hui dans toutes les distributions d'eau.

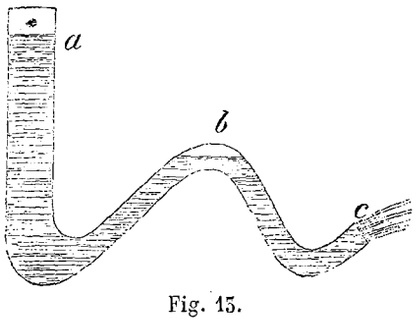

Fig. 13.

Lorsque l'air se loge à la partie haute du tube b et s'y confine en gardant avec l'eau une surface de séparation horizontale, il produit un rétrécissement momentané de section qui entraîne une augmentation de vitesse, et par suite une perte de charge quelquefois considérable.

Mais il arrive souvent que l'air confiné occupe un espace analogue à celui que représente la figure 14 ; l'eau venant du réservoir d'alimentation et de la première partie l_0 de la conduite s'épanche au sommet b comme par un déversoir,

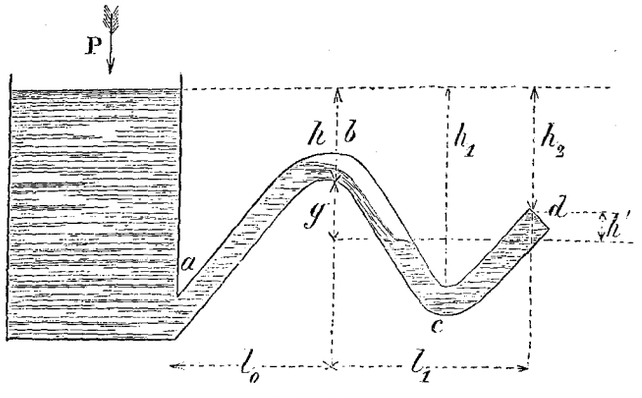

Fig. 14.

s'écoule ensuite pendant quelque temps dans la section descendante comme elle le ferait dans une rigole, et, après un certain temps, finit par remplir de nouveau toute la section du tuyau, de sorte que l'écoulement en d se fait à plein tuyau. La première partie l_0 alimente donc la seconde partie l_1 comme le ferait un réservoir muni d'un déversoir. Nous confondons toujours les longueurs réelles avec leurs projections horizontales.

Désignons par

f	la force élastique de l'air confiné, exprimée en hauteur d'eau,
$h\ h_1\ h_2$	les cotes des points b, c, d,
y	la hauteur de la lame d'eau qui coule en b sur le déversoir,
r et u	le rayon de la conduite et la vitesse de l'eau à pleine section,
g	la hauteur de la bulle d'air,
h'	la différence de niveau entre le pied de la bulle d'air et l'orifice de sortie.

La charge de la première partie l_0 de la conduite est. . . $P+h-y-f$
Et celle de la deuxième partie l_1. . . . . $f-h'-P$.

Appliquant l'équation fondamentale du mouvement de l'eau dans les tuyaux aux deux sections distinctes l_0 et l_1, il vient :

$$P+h-y-f=\frac{l_0}{r}b_1u^2 \qquad f-h'-P=\frac{l_1}{r}b_1u^2$$

Égalant les deux valeurs de f tirées de ces équations, on trouve :

$$h = h' + y + \frac{l_0 + l_1}{r} b_1 u^2$$

on a d'autre part :

$$h - y + g = h' + h_2$$

Combinant ces deux dernières équations, on arrive à :

$$u = \sqrt{\frac{r}{l_0 + l_1} \frac{1}{b_1}} \sqrt{h_2 - g}$$

et cette relation permet de calculer l'influence exercée par la bulle sur la vitesse d'écoulement.

Le cas le plus intéressant à étudier est celui où le tuyau ne donnerait aucun produit ; c'est qu'alors

$$u = o \quad \text{et} \quad y = o$$

ce qui entraîne

$$h_2 = g \quad \text{et} \quad h = h'$$

ces relations signifient que la hauteur de l'espace occupé par la bulle est égale à la charge sur l'orifice extrême de la conduite.

Dans ce cas, la force élastique f de l'air confiné est égale à $(P + h)$.

Cette force élastique est généralement constante, cependant elle varie avec la température ; elle est plus forte en été qu'en hiver, de sorte que l'écoulement pourra s'arrêter en été et recommencer en hiver.

Telle est l'explication d'un fait singulier d'écoulement qui se présentait en 1750 sur la conduite alimentaire du couvent de Sainte-Marie, faubourg Saint-Jacques, à Paris. Cette conduite fonctionnait bien en hiver, en automne et au printemps, mais s'arrêtait lors des grandes chaleurs de l'été ; Deparcieux, consulté à ce sujet, donna les causes du phénomène.

Dans la partie descriptive des appareils, nous reviendrons sur les systèmes mis en œuvre pour l'évacuation de l'air confiné dans les conduites.

DU SIPHON

Le siphon sert à transvaser un liquide d'un vase dans un autre vase situé à un niveau inférieur ; c'est un appareil en usage dans beaucoup d'industries, il peut trouver son application en grand dans les travaux hydrauliques.

Considérons deux réservoirs A et B réunis par un tube deux fois recourbé à angle droit ; ce tube constitue le siphon ; supposons-le amorcé, c'est-à-dire rempli de liquide ; cette opération sera facile si l'on ménage sur la branche horizontale du siphon un orifice à robinet, par lequel on introduira de l'eau qui prendra la place de l'air, les extrémités des deux tubes plongeant dans les réservoirs étant fermées par des robinets.

Le siphon étant rempli, les deux robinets inférieurs ouverts et le robinet supérieur fermé, qu'arrivera-t-il? D'abord, il ne se produira point de disjonction entre deux tranches liquides contiguës du siphon, car cela déterminerait un vide local que la pression atmosphérique extérieure tendrait immédiatement à combler (cela suppose que la hauteur h de la petite branche est inférieure à la hauteur d'eau qui mesure la pression atmosphérique. En outre, une tranche liquide de la branche horizontale du siphon est soumise : à droite, à une pression égale à la pression atmosphérique P diminuée de la hauteur h; à gauche, à une pression égale à la pression atmosphérique P diminuée de la hauteur H; la tranche considérée est donc poussée de droite à gauche, c'est-à-dire du réservoir supérieur au réservoir inférieur, par une charge égale à la différence (H—h) des hauteurs des deux branches du siphon.

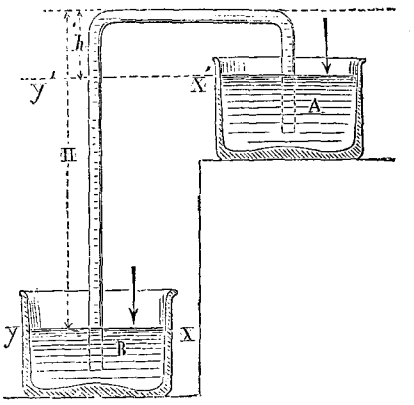

Fig. 15.

Il y aura donc écoulement de A vers B en vertu d'une charge totale (H—h), et la vitesse théorique de l'écoulement sera :

$$v = \sqrt{2g\,(H-h)}$$

La vitesse pratique dépend de la résistance du tuyau ; si l est le développement total du siphon et r son rayon intérieur, l'équation fondamentale du mouvement dans les tuyaux nous donne :

$$r(H-h) = b_1 l u^2.$$

équation d'où on déduira la vitesse moyenne u.

Dégagement de l'air dans le siphon. — La disposition même du siphon nous indique qu'il ne fonctionnera pas si la hauteur h de la petite branche dépasse la pression atmosphérique; le siphon étant rempli complétement et mis en communication avec les deux réservoirs, l'eau de chaque branche s'écoulera dans le réservoir correspondant, il se formera dans la partie haute du siphon une chambre barométrique ; chaque branche sera transformée en un baromètre à eau.

Le siphon ne peut donc fonctionner que si h est inférieure à la pression atmosphérique, c'est-à-dire à $10^m,33$ lorsqu'il s'agit de l'eau.

Même dans le cas du fonctionnement, la pression au sommet du siphon est toujours inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité mesurée par la hauteur de la petite branche. L'air dissous dans l'eau se dégage donc, s'accumule à la partie haute et ne tarde pas à arrêter l'écoulement.

C'est là l'inconvénient du siphon employé comme appareil d'épuisements : nous avons eu l'occasion d'installer dans une galerie de mine percée à flanc de coteau un siphon formé de tuyaux en tôle bitumée ; lorsqu'il était amorcé, il fonctionnait bien pendant quelque temps, puis s'arrêtait, de sorte qu'on n'en tira point tout l'avantage qu'on s'en promettait. Il aurait fallu placer au sommet du siphon une petite pompe à air, mise en mouvement par un enfant ou par une

transmission prise sur une machine motrice ; avec cette addition, le siphon deviendrait un appareil d'épuisement commode et économique.

Siphon renversé. Conduite forcée. — Autrefois, lorsqu'une conduite d'eau avait à franchir une vallée ou une route, on construisait à grands frais des ponts aqueducs monumentaux; aujourd'hui, on les évite autant que possible et on les remplace par des conduites forcées ou siphons renversés.

Soit un canal amenant ses eaux en A avec une vitesse v, il faut faire passer ces

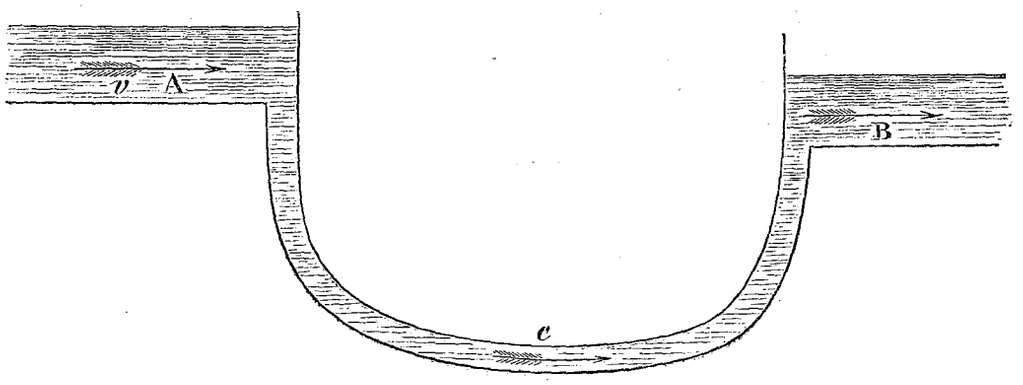

Fig. 16.

eaux de l'autre côté d'une vallée en B où recommence une nouvelle section du canal ; on se sert à cet effet d'une conduite cylindrique en fonte C de longueur l dans laquelle le liquide prend une vitesse u.

Nous admettons qu'à cause des changements brusques de direction, la vitesse v est complétement détruite en A et la vitesse u complétement détruite en B par suite des remous; il en résulte une perte de charge

$$\frac{v^2}{2g}+\frac{u^2}{2g};$$

d'autre part, le frottement dans la conduite C absorbe une charge égale à

$$\frac{b_1 l u^2}{r}$$

On peut donc calculer la perte de charge totale de A en B et par suite l'abaissement que doit éprouver le plafond du canal lorsqu'on passe d'un de ces points à l'autre.

On peut diminuer sensiblement les pertes de charge en terminant la conduite C par des raccords tangentiels de manière que ses orifices d'entrée et de sortie se trouvent dans la direction même du canal. On doit réaliser cette disposition toutes les fois qu'elle est possible.

Écoulement intermittent par siphon. — Le siphon donne lieu à des phénomènes d'écoulement intermittent qui permettent d'expliquer le mécanisme de certaines sources ou fontaines intermittentes que l'on rencontre dans la nature.

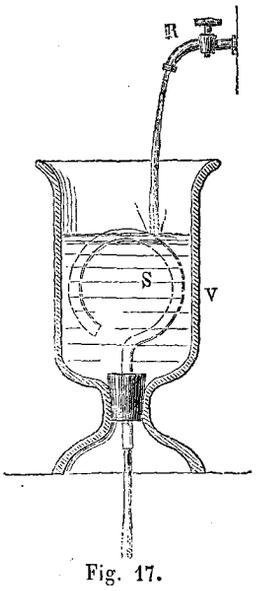

Fig. 17.

Dans un vase V est un siphon S courbé en cercle presque complet et traver-

sant le fond du vase; l'eau arrive par un robinet R dont le débit est moindre que celui du siphon lorsqu'il fonctionne. Le vase se remplissant peu à peu, l'eau finit par dépasser le sommet du siphon, celui-ci se trouve amorcé, il fonctionne et ne tarde pas à vider le vase; puis, quand son orifice d'entrée n'est plus noyé, l'écoulement s'arrête jusqu'à ce que le vase se soit rempli de nouveau jusqu'au sommet du siphon. Et ainsi de suite, de sorte qu'on réalise bien un écoulement intermittent.

CHAPITRE II

QUANTITÉ ET QUALITÉ DES EAUX

QUANTITÉ D'EAU A DISTRIBUER DANS UNE VILLE

La première question à résoudre lorsqu'on prépare un projet de distribution d'eau dans une ville est de savoir quelle quantité d'eau on doit amener pour satisfaire à tous les besoins de la consommation.

Il est impossible de faire une réponse précise à cette question :

On peut dire que la quantité d'eau n'est jamais trop considérable, et qu'il faut en amener le plus possible, lorsqu'on peut le faire sans grande augmentation de frais. Cependant, on est limité soit par le débit des sources d'alimentation dont on dispose, soit par la dépense. Lorsque les sources d'alimentation n'ont pas toute la puissance désirable, il faut bien se contenter de ce que l'on a et une distribution d'eau, même insuffisante, réalisera toujours une amélioration sensible dans la salubrité d'une ville et dans le bien-être de ses habitants. Lorsqu'on est limité dans la dépense, on s'attache à obtenir le minimum du volume nécessaire à tous les services.

L'expérience de ce qui a été déjà fait est un guide utile en ces matières.

« La quantité d'eau nécessaire à l'ensemble des besoins d'une ville, dit M. de Freycinet dans ses *principes de l'assainissement des villes*, varie, pour un même chiffre d'habitants, avec une foule de circonstances locales, le climat, les habitudes, le nombre d'établissements industriels, et surtout avec la superficie relative de la ville ou ce qu'on nomme la densité moyenne de la population. Il est évident, en effet, que dans les villes où la population est clair-semée et où par conséquent les surfaces à entretenir (rues, squares, parcs, jardins, cours...) sont très-étendues par rapport au nombre des habitants, la consommation d'eau est beaucoup plus considérable que dans les villes où cette population est contenue dans des espaces resserrés. On ne peut donc pas assigner un chiffre fixe pour l'approvisionnement d'eau nécessaire à chaque habitant. Il ne peut d'ailleurs être question que d'une limite inférieure, car on ne saurait jamais dire qu'il y ait trop d'eau dans une ville.

On admet qu'avec les habitudes de propreté et de confort qui se sont créées dans les cités modernes, la consommation par tête d'habitant ne doit pas descendre au-dessous de 100 litres d'eau par jour, mais qu'à ce taux les vrais besoins de l'assainissement peuvent être satisfaits. Mais si l'on veut en outre pourvoir à l'agrément et à l'élégance, rafraîchir fréquemment la voie publique, arro-

ser les plantations et les jardins, entretenir des fontaines jaillissantes, la consommation s'élève beaucoup au dessus de ce chiffre et n'a pour ainsi dire plus de limites. D'ailleurs, il faut tenir compte de l'accroissement probable de la population et même faire la part, dans une certaine mesure, des besoins nouveaux qui pourraient se faire jour avec le progrès des mœurs ou de l'industrie. On est donc généralement conduit à adopter un chiffre fort supérieur à celui de 100 litres, surtout quand les circonstances sont favorables, en ce sens que la dépense à faire n'augmente pas beaucoup avec ce chiffre. C'est ainsi qu'on voit des villes pourvues de 300 et 400 litres par tête et que la Rome ancienne qui, à la vérité, se donnait le luxe, inconnu de nos jours, de faire voguer des galères en pleine place publique, jouissait de plusieurs milliers de litres par habitant. »

Rome reçoit encore aujourd'hui 200,000 mètres cubes d'eau par jour pour une population qui ne dépasse guère 200,000 habitants. Au premier siècle de notre ère, neuf aqueducs amenaient sur les sept collines 1,500,000 mètres cubes par jour, soit à peu près le volume que la Marne verse dans la Seine en temps ordinaire.

D'après Darcy, la dépense par tête se compose de deux termes :

1° Pour les usages domestiques, les arrosements de jardin, les bains, les établissements industriels, les incendies, les fontaines monumentales.	90 litres.
2° Pour les bornes-fontaines et l'arrosage des voies publiques . .	60 —
Total par tête d'habitant.	150 litres.

On compte qu'un homme absorbe par jour 2 litres d'eau pour son alimentation et 18 litres pour l'usage extérieur. Chaque habitant d'une maison est donc censé consommer 20 litres d'eau par jour lorsqu'on lui fournit cette eau à discrétion.

A Paris, on adopte pour les abonnements les bases suivantes :

Par personne et par jour.	20 litres.
Par cheval.	75
Par voiture de luxe à deux roues.	40
Par voiture de luxe à quatre roues	75
Par mètre carré de jardin, 500 litres par an et par jour.	1,50
Par force de cheval d'une machine à haute pression. . . .	1,50
— — à détente et condensation.	10
= — à basse pression. . . .	20
Par bain.	300
Par litre de bière faite.	4

Chaque arrosage de la voie publique consomme environ 1 litre par mètre carré; dans les grandes chaleurs, on fait à Paris trois arrosages par jour, ce qui consomme 3 litres par mètre carré de chaussée.

Une borne-fontaine, placée au sommet des pentes, consomme pour le lavage des ruisseaux 6 à 10 mètres cubes par jour.

Quant aux eaux jaillissantes, voici, d'après Dupuit, le débit de quelques fontaines monumentales de Paris :

Gerbe du Palais Royal.	23 litres par seconde.
Place Saint-Georges.	1 —
Place Richelieu.	9 —
Chaque fontaine de la place de la Concorde.	55 —
Gerbe du rond-point des Champs-Élysées.	25 —

La consommation pour les besoins extérieurs de propreté est d'autant plus forte par habitant que l'on peut se procurer de l'eau avec plus de facilité ; ainsi, lorsqu'il existe des robinets dans les cours, la consommation par tête sera plus forte dans une maison à un seul étage que dans une haute maison à six étages.

Ce fait nous enseigne que ce serait un acte de saine philanthropie que de mettre l'eau à la portée immédiate de tous les consommateurs ; les exigences financières des compagnies ne permettent point toujours de le faire. Aussi l'intervention des compagnies doit-elle être rejetée en matière de distribution d'eau ; c'est aux villes à se charger elles-mêmes de l'exploitation des eaux et à s'imposer des sacrifices pour satisfaire à des besoins d'une importance capitale.

« Il faut éviter, dit Dupuit, les erreurs qui résultent de l'abus qu'on fait trop souvent de l'introduction dans les calculs de quantités moyennes, soit pour la consommation, soit pour l'alimentation. La consommation d'eau est très-variable suivant les saisons. Si une ville consomme 200 litres en moyenne, il est très-possible que la consommation pendant les grandes chaleurs s'élève à 250 et même à 300 litres, tandis qu'elle tombera à 150 et même à 100 pendant l'hiver et les jours pluvieux. Si donc l'alimentation se fait par une machine à vapeur, il faudra qu'elle soit capable d'élever 300 litres en vingt-quatre heures, mais l'excédant de charbon brûlé pendant certains jours sera compensé par la diminution qui aura lieu dans d'autres, et pourra se calculer sur 200 litres. Si l'alimentation se fait au moyen de sources amenées par des aqueducs, il faudra que le minimum du produit des sources soit suffisant pour le maximum de consommation. » Si les sources sont irrégulières, on devra parer à leurs défaillances par des machines élévatoires fonctionnant d'une manière intermittente.

En 1854, la ville de Paris avait à sa disposition l'eau de l'Ourcq et l'eau d'Arcueil, l'eau de Seine élevée par machines à vapeur, l'eau du puits de Grenelle, l'eau de Belleville et des prés Saint-Gervais, en tout 147,800 mètres cubes par jour, soit, pour 2 millions d'habitants, environ 75 litres par jour.

Aujourd'hui elle possède, outre les eaux précédentes, celles qui proviennent de la Marne, de divers puits artésiens, de la Dhuis et de la Vanne, en tout plus de 400,000 mètres cubes par jour, soit 200 litres par habitant.

Peut-être, dans un avenir prochain, faudra-t-il songer à augmenter encore cette proportion, et recourir pour les services publics à une distribution spéciale d'eau de Seine.

« On est frappé, dit M. l'ingénieur Huet, du développement que prennent les besoins d'eau dans une ville d'autant qu'ils sont mieux satisfaits, lorsqu'on considère les résultats d'une expérience récente. On parlait généralement, il y a peu d'années encore, de 200 litres d'eau en moyenne, par jour et par habitant, comme d'une quantité *maxima* avec laquelle on devait pourvoir à tous les besoins.

C'est en Amérique, où les nécessités du bien-être matériel ont pénétré dans les masses et où les moyens d'y satisfaire ont appelé promptement l'attention des administrations locales, que l'insuffisance de cette quantité d'eau a d'abord été constatée. Dès 1851, la consommation moyenne s'élevait, l'été, à Philadelphie, à 250 litres environ par habitant; à New-York, on constatait, en 1873, pendant les grandes chaleurs, une consommation, les samedis, de plus de 400 litres par habitant.

« Si nous venons en Europe, et que nous considérions les villes le plus abondamment pourvues, nous voyons Glascow qui, en 1854, absorbe complétement sa dotation provisoire de 200 litres par habitant, en en consacrant 162 exclusi-

vement à ses usages domestiques, 38 litres restant, non pas seulement pour le service public, mais encore pour ses fabriques et ses besoins industriels. Une pareille répartition paraît anormale en France, où la consommation des services publics, de l'arrosage des rues, du lavage des ruisseaux, des fontaines monumentales, etc., est toujours bien supérieure à celle du service privé. En Angleterre, au contraire, elle est générale ; à Londres, où la consommation est aujourd'hui de 136 litres environ par habitant, on ne compte qu'une fontaine monumentale, et le service public de l'arrosage des rues et du lavage des ruisseaux n'existe pour ainsi dire pas ; l'eau y est presque exclusivement consacrée aux usages domestiques. Lorsque le service public aura pris, dans les villes d'Angleterre, le développement qu'il a dans les principales villes de France, et que, en France, les besoins domestiques seront devenus ce qu'ils sont en Angleterre ou en Amérique, la consommation s'élèvera facilement, de part et d'autre, à 300 ou 400 litres par habitant. »

Nous avons trouvé dans divers documents des renseignements sur le volume d'eau distribué par jour et par habitant dans diverses villes, et nous les avons réunis dans le tableau suivant :

QUANTITÉS D'EAU PAR JOUR ET PAR HABITANT.

Angoulême	35 à 40	litres.	Manchester	190	litres.
Besançon	246	—	Marseille	85	—
Bordeaux	170	—	Metz	470	—
Bruxelles	80	—	Montpellier	20 à 25	—
Cette	106	—	Munich	50 à 60	—
Clermont	50 à 55	—	Nantes	80	—
Constantinople	20	—	Narbonne	62 à 78	—
Dijon	198 à 678	—	Paris	20	—
Édimbourg	50	—	Rome	1100	—
Saint-Étienne	170	—	Toulouse	62 à 78	—
Gênes	120	—	Madrid	100	—
Glascow	560	—	Boston	390	—
Grenoble	60 à 65	—	New-York	200	—
Hambourg	125	—	Brooklyn	63	—
Le Havre	40 à 65	—	Chicago	168	—
Londres	136	—	Jersey City	258	—
Lyon	100	—	Philadelphie	139	—

QUALITÉS DES EAUX

L'eau pure est formée de la combinaison de deux gaz, l'oxygène et l'hydrogène, dans la proportion de 1 volume du premier pour 2 du second, ou de 8 parties en poids du premier pour 1 du second.

Le composé chimique ainsi défini ne se rencontre pas dans la nature. La grande masse liquide qui forme les mers est un foyer d'évaporation continuelle, et les vapeurs, entraînées par les vents, engendrent les nuages qui se résolvent en pluie. La pluie dissout les gaz de l'atmosphère et, tombée sur le sol, soit qu'elle glisse à la surface, soit qu'elle pénètre dans les profondeurs, elle rencontre une infinité de sels et de substances plus ou moins solubles dont elle se charge.

On conçoit donc que la nature de l'eau est des plus variables et des plus complexes, et dépend essentiellement de sa provenance.

On distingue trois espèces d'eau principales : 1° l'eau de pluie; 2° l'eau de rivière; 3° l'eau de sources. Nous allons en rappeler sommairement la composition et les qualités.

1° *Eau de pluie.* — L'eau de pluie renferme surtout des principes gazeux : l'acide carbonique, l'ammoniaque et les acides oxygénés de l'azote (produits probablement par les phénomènes électriques de l'atmosphère), quelquefois un peu d'acide sulfureux et d'hydrogène sulfuré (au voisinage des villes et des grandes usines), et enfin des sels entraînés avec l'eau de mer, tels que les chlorures et sulfates de soude, de magnésie et de chaux. C'est le chlorure de sodium qui domine, et sa proportion varie en général de 2 à 4 grammes par mètre cube d'eau.

Aux principes minéraux s'ajoutent souvent des particules organiques entraînées par les vents à des distances considérables.

La somme des matières solides contenues dans un mètre cube d'eau de pluie dépasse rarement 50 grammes, et n'est guère en moyenne que de 30 grammes.

2° *Eau de rivière.* — L'eau qui tombe sur le sol agit sur les formations géologiques qu'elle rencontre; elle dissout certaines substances, elle en attaque d'autres chimiquement, grâce à l'acide carbonique et à l'ammoniaque qu'elle renferme, enfin elle exerce une action mécanique plus ou moins énergique qui se traduit par un broyage et une pulvérisation des roches de toute nature. Les débris sont entraînés par les eaux et se déposent à mesure que la vitesse du courant diminue; les plus gros tombent d'abord, et les particules vaseuses restent en suspension, même au milieu d'eaux animées de très-faibles vitesses.

La composition de l'eau de rivière varie donc suivant les époques, suivant la constitution géologique, la pente et la forme du lit.

Les matières solides maintenues en suspension sont quelquefois en quantités considérables. Ainsi le Nil contient 1,500 grammes de matières en suspension par mètre cube, le Gange de 200 à 300 grammes suivant les saisons, le Rhin de 20 à 200 grammes. Les matières en suspension, à moins qu'elles ne soient à l'état de vase absolument impalpable, ne sont pas d'un grand inconvénient pour les machines à vapeur, car il suffit de faire passer les eaux dans des bassins où elles se déposent.

La quantité de matière solide dissoute est beaucoup plus considérable dans l'eau de rivière que dans l'eau de pluie. Ainsi la Meuse abandonne à l'évaporation 125 grammes de matière solide par mètre cube, la Loire et la Garonne 135 grammes, le Rhône 182 grammes, le Rhin 150 à 300 grammes, la Marne 500 grammes, le canal de l'Ourcq 1 kilogramme, la Seine de 190 à 430 grammes.

La proportion des matières solides dissoutes va généralement en augmentant à mesure qu'on s'éloigne de la source.

C'est le carbonate de chaux qui domine parmi ces matières. Dans la Loire, il constitue 53 p. 100 du résidu, dans la Tamise 50, dans le Danube 60, dans la Seine 75 et dans le Rhin 85.

Outre les sels minéraux que l'on trouve dans les eaux de pluie, les eaux de rivière entraînent surtout du carbonate de chaux, du sulfate de chaux, des sels de magnésie et des sels alcalins, de l'alumine et de l'oxyde de fer, quelquefois de la silice en proportion notable, rarement des azotates et des phosphates.

A tout cela il faut joindre, notamment à l'aval des grandes villes, une proportion plus ou moins forte de matières organiques, qui rendent les eaux impropres à l'alimentation. Nous ne parlerons pas non plus des gaz en dissolution

qui peuvent varier, dans la Seine, de 30 à 35 centimètres cubes par litre d'eau.

Des eaux de rivière il faut rapprocher les eaux des lacs, qui renferment les éléments de l'eau de pluie, plus les substances empruntées à leur propre cuvette. Dans les montagnes granitiques, l'eau des lacs sera riche en sels alcalins; dans les pays calcaires, elle renferme une grande proportion de sels de chaux; dans certaines régions volcaniques, les lacs sont chargés de bitumes et de goudrons, telles sont la mer Morte et la mer Caspienne.

3° *Eau de source et de puits.* — On peut admettre approximativement que les trois dixièmes seulement de l'eau de pluie s'écoulent à la surface du sol; le reste pénètre dans ses profondeurs, jusqu'à ce qu'il rencontre une cuvette imperméable dont il gagne la partie la plus basse. Les sources abondantes se trouvent donc à des profondeurs variables suivant les pays, et nous avons vu des puits artésiens descendre jusqu'à 800 et 900 mètres au-dessous du sol.

Les eaux, qui pénètrent ainsi dans la terre, se trouvent filtrées et prennent une limpidité bien supérieure à celle des rivières ; mais, de cette limpidité, il faut bien se garder de conclure la pureté chimique.

En effet, l'eau s'échauffe rapidement à mesure qu'elle pénètre dans le sol ; elle dissout quelquefois de grandes quantités de gaz carbonique et sulfhydrique ; dans ces conditions, elle devient apte à dissoudre des proportions considérables de sels minéraux, qu'elle contient encore au moment où elle reparaît à la surface du sol. L'eau de source est donc généralement impure, et les impuretés ne s'y trouvent pas en suspension, mais seulement en dissolution.

Voici les résultats déduits de nombreuses analyses chimiques :

Le résidu solide après dessiccation est compris d'ordinaire entre 20 et 1,250 grammes par mètre cube ; exceptionnellement, il dépasse ce dernier chiffre et peut atteindre plusieurs kilogrammes par mètre cube.

La majeure partie se compose de carbonates : on en trouve d'ordinaire de 6 à 600 grammes par mètre cube; exceptionnellement, jusqu'à 1,500 grammes.

Les chlorures entrent pour 2 à 500 grammes par mètre cube.
Et les sulfates — pour 1 à 1250 — —

Les trois genres de sels existent toujours ; la silice fait quelquefois défaut, on en trouve dans certaines eaux dans la proportion de 1 à 400 grammes.

Les phosphates et azotates manquent la moitié du temps et n'entrent que dans de faibles proportions.

On trouve presque toujours un peu d'alumine et d'oxyde de fer dans des proportions variables ainsi qu'un peu de matières organiques.

On voit qu'en somme nous ne pouvons rien dire de précis; dans chaque cas, on se rendra compte par une expérience directe de la composition de l'eau qu'on se proposera d'employer.

Analyse d'une eau. — La connaissance du résidu solide est la chose la plus intéressante à tous égards; la méthode la plus simple d'analyse consistera donc à évaporer dans une bassine un poids connu d'eau et à recueillir le résidu solide qu'on analysera comme nous avons expliqué que l'on faisait pour une pierre calcaire. Ce qu'il importe de déterminer avec précision, ce sont les proportions de carbonate et de sulfate de chaux, ainsi que la silice, si elle existe en grande quantité.

On peut, au préalable, se rendre un compte approximatif des substances étrangères contenues dans l'eau. Ainsi :

1° L'oxalate d'ammoniaque donne un précipité blanc d'oxalate de chaux tant qu'il reste un sel de chaux dans la liqueur ;

2° Le sulfhydrate d'ammoniaque précipite tous les sels métalliques à l'état de sulfures ;

3° L'azotate de baryte indique la moindre trace d'acide sulfurique ou de sulfate soluble ; il se forme en effet un précipité blanc caractéristique de sulfate de baryte ;

4° De même l'azotate d'argent indique la moindre trace de chlorure ; il se forme un précipité blanc, semblable au lait caillé, qui noircit à la longue.

5° En présence des matières organiques, le chlorure d'or est décomposé et l'or se précipite en poudre noire impalpable.

6° La teinture alcoolique de bois de campêche du jaune passe au violet en présence de l'ammoniaque ou du carbonate d'ammoniaque.

Ce sont les sels calcaires qui communiquent aux eaux les plus fâcheuses propriétés, et qui constituent ce qu'on appelle les eaux crues, impropres à l'alimentation des machines à vapeur et aux usages domestiques.

Le plus nuisible est le sulfate de chaux qu'on trouve dans les eaux de puits de Paris, connues sous le nom d'eaux séléniteuses. Avec le savon ordinaire, le sulfate de chaux donne un savon calcaire insoluble, qui se précipite sur le linge en entraînant avec lui toutes les impuretés ; on n'arrive de la sorte qu'à nettoyer imparfaitement le linge, malgré une consommation de savon très-considérable.

Les légumes renferment un principe qui se combine à la chaux, pour former un composé solide, de sorte que les légumes, cuits dans une eau calcaire ou séléniteuse, durcissent de plus en plus au lieu de s'amollir.

Hydrotimétrie. — L'hydrotimétrie est la mesure de la crudité de l'eau. En voici le principe : la dissolution alcoolique de savon produit dans une eau non chargée de sels terreux (calcaires ou magnésiens) une mousse persistante à la surface ; au contraire, s'il y a dans l'eau des sels terreux, la mousse ne se produit pas et il se forme des grumeaux insolubles qui sont des savons calcaires.

On prépare une dissolution titrée de savon, c'est-à-dire que l'on dissout un poids connu de savon dans un volume connu d'alcool à un certain degré. La dissolution faite, on la met dans une burette graduée, et, grâce aux données précédentes, on sait combien une division de la burette contient de savon. On verse goutte à goutte la dissolution de savon dans l'eau qu'on veut essayer, et l'on agite après avoir versé chaque goutte ; tant qu'il ne se produit pas une mousse persistante, c'est qu'il reste encore des sels terreux dans la liqueur ; aussitôt qu'on reconnaît l'existence de la mousse persistante, l'opération est terminée ; on lit alors sur la burette combien de divisions de la dissolution on a employées, et, s'il y en a par exemple 17, on dit que l'eau marque 17°, à l'hydrotimètre considéré. Si partout on emploie le même hydrotimètre, la même dissolution de savon, il est clair que tous les résultats sont comparables, et que l'on a de la sorte des renseignements précieux sur la crudité relative des eaux employées.

En somme, ce procédé ne donne que des indications approchées ; dans des dissolutions qui ne renfermeraient que des sels neutres de chaux, on pourrait de la sorte calculer exactement la proportion de ces sels ; mais les sels de magnésie décomposent aussi le savon, de même l'acide carbonique ; à ce sujet il faut remarquer que la mousse persistante ne tarde pas elle-même à disparaître,

parce que l'acide carbonique de l'air la décompose. Les matières organiques modifient aussi les résultats.

Toutefois, l'hydrotimètre donne des renseignements fort utiles et très-précieux dans la pratique. Le degré de crudité usité en Angleterre (degré de Hardness) correspond à peu près à $0^{gr},0142$ de carbonate de chaux par litre d'eau ; le degré français correspond à $0^{gr},01$ de carbonate de chaux par litre ; ainsi une eau qui marque 20° à l'hydrotimètre renferme théoriquement $0^{gr},20$ de calcaire par litre.

Voici quelques renseignements donnés par M. l'inspecteur général Belgrand :

Sources du granit du Morvan.	2° à 11°	à l'hydrotimètre.
— des sables de la craie inférieure. .	7° à 12°	—
— des sables de Fontainebleau. . . .	6° à 22°	—
— de la craie blanche.	12° à 17°	—
— des calcaires de la Beauce.	17° à 25°	—
— Du niveau des marnes vertes et des marnes du gypse (eaux séléniteuses).	23° à 155°	—

CARACTÈRES DES EAUX POTABLES

Une eau potable est celle qui convient à tous les usages domestiques, qui est limpide, fraîche, agréable au goût, facile à digérer.

L'eau, introduite dans l'organisme, ne lui apporte pas seulement le principe aqueux, composé d'hydrogène et d'oxygène, principe indispensable aux réactions chimiques de la nutrition ; elle lui apporte encore des sels minéraux en dissolution, tels que le carbonate de chaux ou alcalin, nécessaire à la formation de la charpente osseuse des animaux.

En dehors de cette composition chimique, il faut que l'eau soit agréable au goût ; sans doute, une eau peut être saine pour l'alimentation, sans cependant être agréable au goût, et cette question du goût est un peu secondaire, elle dépend de l'habitude et de l'éducation des organes. Nous voyons souvent les animaux boire, sans en être incommodés, des eaux de mare sales et chargées de matières organiques, dont nous ne voudrions certainement pas.

La limpidité est une qualité indispensable à l'eau potable ; l'eau trouble ou louche nous inspire toujours une certaine répugnance, et, lorsqu'on s'en sert comme boisson, on la débarrasse des matières en suspension par un filtrage préalable. Les eaux troubles ont en outre l'inconvénient d'introduire dans l'organisme des matières inertes, quelquefois même nuisibles.

La température d'une eau exerce une grande influence sur sa valeur alimentaire ; l'eau chaude, d'une température supérieure à celle du sang, agit comme vomitif ; de même l'eau tiède, c'est-à-dire celle qui possède une température peu inférieure à celle du corps. L'eau la plus agréable et la plus saine est celle qui possède une température moyenne, 6° à 14° sous notre climat ; il est clair que la fraîcheur est une question relative ; dans les pays chauds, une eau pourra paraître fraîche que l'on trouverait chaude sous une latitude plus élevée. L'eau froide, dont la température est voisine de zéro, donne une sensation momentanée plus agréable, mais paraît rendre la digestion un peu plus difficile.

L'eau distillée, c'est-à-dire dépouillée des gaz qu'elle tenait en dissolution, est lourde à digérer et répugnante. De même, mais dans une moindre proportion, l'eau stagnante, exposée depuis longtemps à l'air; pour être légère, une eau demande à être bien aérée. L'eau potable doit donc renfermer les deux éléments gazeux de l'atmosphère, l'oxygène et l'azote; si elle renferme une proportion notable d'acide carbonique, elle n'en sera que plus agréable à boire; elle se rapprochera des boissons gazeuses. L'eau distillée, exposée à l'air, ne reprend que lentement ses principes gazeux; pour l'aérer convenablement, il faut l'agiter au moyen de roues à palettes ou y projeter de l'air comprimé. C'est ce qu'on fait sur les navires pour l'eau provenant de la distillation de l'eau de mer; cette eau, sortant de l'alambic, a toujours une odeur nauséabonde, due à la décomposition des matières animales que l'eau de mer tenait en suspension, et il est nécessaire de la purifier par un filtrage au noir animal.

Dans l'économie domestique, on distingue les eaux dures ou crues des eaux douces. Les premières ne dissolvent pas le savon, elles sont impropres, ainsi que nous l'avons expliqué déjà, au blanchissage du linge et à la cuisson des légumes; elles contiennent une grande quantité de chaux, qui se combine à la légumine des végétaux pour donner un sel insoluble, ou qui décompose le savon pour se combiner à l'acide gras et former un nouveau savon insoluble; ce savon insoluble se précipite sur le linge et entraîne toutes les impuretés, de sorte que, non-seulement on consomme beaucoup plus de savon qu'avec de l'eau douce, mais encore on obtient du linge d'une blancheur douteuse. Il paraît que l'influence de l'eau dure est très-sensible dans la préparation du thé; elle exige pour donner une infusion d'égale force, beaucoup plus de feuilles qu'il n'en faudrait avec de l'eau douce et beaucoup plus de temps. L'influence de l'eau est très-grande sur la consommation de savon; une eau bien chargée de calcaire peut consommer trois fois plus de savon que l'eau de pluie, qui est le type de l'eau douce.

La dureté de l'eau tient à la présence de la chaux, qu'elle soit à l'état de sulfate ou de carbonate; la magnésie agit comme la chaux.

L'ébullition amène la séparation d'une partie des sels calcaires qui se précipitent; elle a donc pour effet d'adoucir l'eau.

La dureté tient à une forte proportion de calcaire, qui ne peut se maintenir en dissolution qu'à l'état de bicarbonate, c'est-à-dire avec un excès d'acide carbonique; si on ajoute de la chaux à l'eau dure, le bicarbonate est réduit, il n'y a plus que du carbonate simple que l'eau ne peut maintenir tout entier en dissolution et qui se précipite en grande partie. En ajoutant à de l'eau crue un lait de chaux, on peut donc la rendre beaucoup plus douce. L'agitation suffit à chasser l'excès d'acide carbonique et à précipiter le carbonate, comme on le voit quelquefois sur les roues de moulins; il en est de même du filtrage, l'excès de calcaire reste dans le filtre.

Ce procédé est évidemment inapplicable aux eaux séléniteuses, c'est-à-dire chargées de sulfate de chaux.

Une eau potable ne doit pas être dure, car alors elle est difficile à digérer et peu agréable au goût; elle ne doit pas non plus être trop douce, car elle ne fournirait plus au corps les éléments minéraux qui lui sont nécessaires. Cependant cet inconvénient est bien moindre que la dureté, car les éléments minéraux peuvent être introduits par les autres aliments.

Suivant quelques chimistes, pour être potable, il ne faut pas que l'eau renferme plus de $0^{gr},5$ de résidu solide par litre.

D'après M. Belgrand, elle ne doit pas marquer plus de 20° à l'hydrotimètre, ce qui correspond à 20 centigrammes de carbonate de chaux par litre.

Les sels alcalins, chlorures et azotates, sont nuisibles lorsqu'ils entrent dans l'eau en proportion notable; ils ont une saveur désagréable. Ainsi, lorsque la proportion de chlorure dépasse 1 pour 100, l'eau commence à brûler le palais, elle ne désaltère pas et se rapproche de l'eau de mer; ce sont en effet les sels alcalins qui s'opposent à ce que notre estomac puisse supporter l'eau de mer. Les sels de magnésie ont une saveur métallique fort désagréable; les azotates alcalins produisent un effet analogue et sont préjudiciables à la santé.

On a prétendu que la présence de l'iode était nécessaire pour rendre une eau potable; on a prétendu que le goître des Alpes et de l'Isère tenait à l'absence de l'iode dans l'eau d'alimentation, ou à la présence de la magnésie en quantité exceptionnelle. Ces assertions ne paraissent pas justifiées et la présence du goître semble bien plutôt tenir à un ensemble de causes.

Beaucoup d'eaux renferment des matières organiques; en petite quantité, elles n'empêchent point l'eau d'être potable, mais elles ne lui sont pas nécessaires. En quantité notable, elles communiquent à l'eau une saveur désagréable, elles lui donnent un goût. Une eau, chargée de matières organiques, qui reste en repos à une température douce, entre en putréfaction par la fermentation de ces matières; elle dégage une odeur infecte, les sulfates sont transformés en sulfures; il s'y développe des végétations et des infusoires; l'eau n'est plus potable. L'eau, qui coule avec une certaine rapidité, ne se putréfie pas.

Résumé des qualités d'une eau potable. — Pour résumer les qualités d'une eau potable, nous empruntons à M. Belgrand les quelques lignes suivantes:

Le service d'une ville doit être fait dans des conditions telles, que la population consomme l'eau qui lui est distribuée dans l'état où elle sort des fontaines publiques.

L'eau des conduites publiques doit donc être potable sans aucune préparation, c'est-à-dire être fraîche, limpide, sans odeur ni saveur, sans mélanges répugnants, en un mot être agréable à boire. Il faut surtout qu'elle soit salubre et propre à tous les usages domestiques, notamment qu'elle cuise les légumes, et dissolve le savon; la sécurité de la distribution exige aussi qu'elle ne forme point de dépôts calcaires dans les conduites et n'y développe pas de tubercules ferrugineux.

L'eau peut être considérée comme salubre lorsque les populations qui en font usage depuis longtemps sont saines, vigoureuses et sans maladies spéciales.

L'eau est limpide lorsqu'elle laisse voir distinctement les objets dans des profondeurs de trois á quatre mètres.

On ne connaît pas bien dans quelles conditions se développent les tubercules ferrugineux, qui obstruent si vite les conduites; on voit seulement qu'ils croissent rapidement dans certaines eaux chimiquement pures, comme celles du granite, surtout lorsqu'elles sont limpides.

Du choix à faire entre les eaux de sources et les eaux de rivières. — Lorsqu'il s'est agi d'arrêter définitivement, il y a quelques années, le système de distribution d'eau de Paris, la question s'est posée du choix à faire entre deux systèmes radicalement opposés : 1° amener à Paris les eaux de certaines sources reconnues parfaitement potables, 2° ou bien élever par des machines les eaux de la Seine jusqu'à des réservoirs disposés sur les hauteurs de la ville. Ce sont les dérivations des sources qui l'ont emporté.

Monsieur Aristide Dumont s'est montré dans plusieurs ouvrages le champion des machines élévatoires, et il met en avant les raisons suivantes :

Avec les dérivations presque terminées aujourd'hui, on n'arrive à donner que 200 litres d'eau par habitant; c'est une quantité beaucoup trop faible, car les besoins vont se développer rapidement et il faudra chercher à grands frais de nouvelles sources lorsque l'adjonction d'une machine conduirait au même résultat ; il faut, suivant lui, prévoir que dans l'avenir on devra satisfaire à une consommation égale à celle de l'ancienne Rome, c'est-à-dire un mètre cube par habitant et par jour ; seule, la Seine est capable de fournir un pareil débit.

Le produit des sources est nécessairement variable, il se réduit souvent au tiers et même au dixième de son volume normal; il faut donc s'attendre, dit M. Dumont, à des déceptions inévitables. Les sources baissent toujours en été, c'est-à-dire à l'époque où les besoins augmentent.

Les aqueducs des longues dérivations entraînent des dépenses considérables qui peuvent n'être pas en rapport avec les résultats obtenus, tandis qu'avec les machines on recueille toujours un résultat proportionnel à la dépense qu'on a faite.

Monsieur Belgrand fait valoir comme il suit les raisons qui militent en faveur des dérivations des sources :

Les eaux des grandes rivières ne sont généralement pas incrustantes et ne développent point la formation des tubercules ferrugineux dans les conduites ; c'est donc un avantage qu'elles présentent sur la généralité des eaux de sources ;

Les eaux de rivières ne sont ni malsaines, ni désagréables, lorsqu'elles ne sont point souillées par les déjections des villes ou lorsqu'elles n'ont pas traversé des couches gypseuses ;

« Mais les eaux courantes du bassin de la Seine sont troubles en temps de crue, louches en toute saison, chaudes l'été, froides l'hiver. Elles ont toujours une saveur prononcée et par conséquent ne sont pas agréables à boire.

On peut dire aussi qu'en général les eaux de rivière, dans le voisinage des grandes villes, sont corrompues par des détritus organiques de la nature la plus répugnante et que, depuis quelques années, cette corruption s'accroît très-rapidement.

En France, les populations rurales ne boivent presque jamais d'eau de rivière ; elles donnent la préférence aux eaux de puits et de sources, qui sont au moins agréables à boire, même lorsqu'elles sont privées des autres qualités des bonnes eaux potables.

Les eaux de sources, convenablement choisies, sont donc seules potables à l'état naturel. On n'a trouvé jusqu'ici aucun procédé pour ramener les eaux de rivière à cet état irréprochable. »

Nous démontrerons en effet plus loin que le filtrage est impuissant à produire la purification complète des eaux de rivière.

Il ne semble donc pas douteux que l'on doive toujours préférer une bonne eau de source à l'eau de rivière, et par conséquent les aqueducs de dérivation aux machines élévatoires, et on a eu raison, pour une ville comme Paris, d'aller chercher au loin et à grands frais les eaux de la Dhuis et de la Vanne.

Quand il s'agit d'une ville secondaire n'ayant que de faibles revenus, on ne peut pas toujours trouver immédiatement le gros capital nécessaire à la dérivation d'une source éloignée; on préfère grever le budget de chaque année de la dépense qu'occasionnera l'entretien et le fonctionnement des machines; dans ces conditions, l'installation de machines élévatoires peut être opportune. Mais, à

dépense égale, on devra toujours préférer les eaux de sources, qui n'exigent point l'usage de filtres dont le fonctionnement est souvent irrégulier.

DU FILTRAGE DES EAUX

Le filtrage est l'opération qui consiste à débarrasser les eaux de toutes les matières solides qu'elles tiennent en suspension. Le principe commun à tous les filtres consiste à faire passer l'eau à travers un corps poreux et perméable ; le liquide seul peut achever son voyage à travers les canaux fins et contournés du corps poreux et les corpuscules solides restent à la surface.

Il convient donc, avant de commencer la description des filtres, de connaître les circonstances du mouvement de l'eau à travers les corps poreux et perméables.

Lois de l'écoulement de l'eau à travers le sable et les terrains perméables. — C'est à Darcy qu'on doit les premières recherches sur les lois de l'écoulement de l'eau à travers le sable.

Il se servit de l'appareil représenté par la figure 3 planche 2 : dans une conduite verticale en fonte de $0^m,35$ de diamètre intérieur et de $3^m,50$ de hauteur, on a placé une cloison horizontale, composée de deux grilles superposées à angle droit, et sur cette cloison on a placé une couche d'épaisseur variable de bon sable siliceux présentant environ 38 pour 100 de vide. L'eau arrive au sommet de la conduite par un tuyau à robinet sous pression variable, elle traverse le sable et s'écoule dans un bassin gradué où on en mesure le volume ; deux manomètres à mercure placés l'un en haut, l'autre en bas de l'appareil, permettent d'évaluer la pression sous laquelle l'écoulement s'effectue.

On a fait varier les charges et les hauteurs de sable et l'on a reconnu que le débit croit proportionnellement à la charge et en sens inverse de la hauteur du sable, pourvu que le sable conserve une nature constante.

Ainsi, pour un sable de même nature, on peut admettre que le volume débité est *proportionnel à la charge et en raison inverse de l'épaisseur de la couche traversée.*

On trouvera une explication rationnelle de ce résultat dans l'examen de la formule fondamentale de l'écoulement de l'eau dans les tuyaux.

Nous savons en effet que, dans un tuyau de rayon constant, il y a entre la charge h et la vitesse la relation :

$$h = \alpha u + \beta u^2;$$

or, la vitesse est proportionnelle au débit, donc

$$h = a.q + b.q^2.$$

Une couche de sable doit être considérée comme traversée par une infinité de petits tuyaux capillaires, ayant chacun un très-faible débit ; l'importance du terme en q^2 est donc très-faible par rapport à l'importance du terme en q et la relation précédente se réduit sensiblement à

$$h = a.q$$

D'après la loi de Darcy, en désignant par q le débit d'un filtre par mètre carré de section, par h la charge sous laquelle l'écoulement se produit, par e l'épaisseur de la couche filtrante, et par k un coefficient qui dépend de la nature du filtre, on a la relation :

$$q = k.\frac{h}{e};$$

$\left(\frac{h}{e}\right)$ n'est autre que la perte de charge j par mètre de parcours de l'eau à travers le sable, le débit q est proportionnel à la vitesse u, de sorte que l'équation précédente peut s'écrire :

$$j = \mu.u.$$

C'est la forme que lui donne Dupuit, et cette forme peut être considérée comme un résultat d'expérience.

Darcy, avec le sable siliceux renfermant 38 pour 100 de vide, a trouvé :

$$q = 0{,}0003.\frac{h}{e} = 0{,}0003.j$$

q est le débit par mètre carré, il est le produit du vide que présente cette section d'écoulement par la vitesse u, donc

$$q = 0{,}38.u$$

et il en résulte

$$j = 1266.u$$

Il s'agissait d'un gros sable; avec un sable fin, le débit n'est guère que de 6 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures sous une charge de $1^{m},50$, soit $4^{mc},5$ pour une charge et une épaisseur de 1 mètre; en admettant 30 pour 100 de vide, on trouve

$$j = 5760.u$$

Ces formules nous montrent combien la vitesse d'écoulement est faible; ainsi l'eau, qui traverse une couche de sable d'un mètre de hauteur, prend seulement une vitesse égale à $\frac{1}{5760}$, ce qui fait environ 0,000,02.

« Maintenant, si l'on imagine de l'eau s'écoulant à travers un pareil terrain, disposé sur le flanc d'un coteau ou dans le fond d'une vallée, la vitesse se trouve réduite à des centièmes et à des millièmes de millimètre et à des fractions plus petites encore pour des sables très-fins. Or, il s'agit là de terrains facilement perméables et la nature en présente de plus compactes et de plus serrés; on voit donc que, dans l'ordre de phénomènes que nous étudions le coefficient μ représente toujours un nombre considérable, et que la vitesse u n'est jamais qu'une fraction de millimètre. »

Action des filtres. — Tous les corps poreux sont susceptibles de constituer des filtres, puisqu'ils retiennent dans leurs interstices les substances solides en suspension dans l'eau qui les traverse.

Dans les laboratoires, lorsqu'on veut séparer les précipités des liquides où ils se sont formés, on se sert de papier non collé, de tissus de diverses natures, de

plaques de terre cuite ou de gypse ; pour filtrer l'eau destinée à l'alimentation, on a recours à l'une des matières suivantes: cailloux, sable, gravier, pierre ponce, tissus fibreux, tels que la laine ou la bourre de laine, drap, feutre, flanelle, sciure de bois, coton, ouate, étoupe, crin, éponge, charbon de bois, noir animal.

Ces matières doivent être bien lavées au préalable, c'est-à-dire débarrassées de toutes les particules vaseuses ; elles s'engorgent par l'usage et doivent être plus ou moins fréquemment revivifiées par un lavage énergique.

Nous empruntons à la chimie technologique de Knapp (traduction Debize et Mérijot) les observations générales suivantes sur la question des filtres:

« *Action sur les matières en suspension.* — Lorsque de l'eau trouble traverse ces matières, les parties les plus grossières s'arrêtent à la surface ; les plus fines se déposent dans les canaux capillaires que forme la masse, et l'eau sort claire. On conçoit que, par l'effet même de cette clarification, les matières filtrantes doivent se charger d'impuretés, les canaux s'obstruent peu à peu, et il arrive enfin un instant où le filtre, ne laissant plus rien passer, doit être mis hors de service. Cet engorgement des filtres ne saurait jamais être évité d'une manière absolue, puisqu'il tient à la nature même des fonctions des appareils, mais on peut en réduire les effets en choisissant convenablement les matières filtrantes. Plus les pores de ces matières sont fins, plus tôt ils s'obstruent, et réciproquement. Ainsi le sable cesse d'agir beaucoup plus tôt que les cailloux. Il suit de là que les filtres doivent être formés de couches successives de matières à gros grains, suivies de couches à grains fins. L'eau, passant d'abord sur les premières, s'y débarrasse de ses impuretés les plus grossières, qui ne viennent plus engorger les couches suivantes. Celles-ci conservent donc leur action plus longtemps, sans que les couches supérieures soient mises hors de service, et la durée totale du filtre se trouve notablement augmentée. Lorsqu'un filtre est engorgé et n'agit plus, si l'on y fait passer de l'eau pure en sens inverse du trajet habituel, cette eau reprend une grande partie des impuretés déposées dans les interstices et à la surface. On peut de la sorte renouveler, pour ainsi dire, la matière filtrante et lui rendre, sinon toute sa valeur primitive, au moins une grande partie de son action. En traversant les pores étroits d'un filtre, l'eau éprouve des frottements qui doivent être vaincus par une charge suffisante de la colonne liquide. Une augmentation de la charge peut donc faciliter notablement la filtration, mais, au delà d'une certaine limite, elle la gêne, parce que la matière du filtre, surtout quand elle est élastique, est trop fortement pressée, et que la circulation de l'eau y devient plus difficile. On distingue donc les filtres sous pression des filtres ordinaires sans pression. Les filtres peuvent d'ailleurs être disposés à volonté pour que l'eau les traverse soit de haut en bas, soit de bas en haut, soit horizontalement. On choisit dans chaque cas particulier celui de ces dispositifs qui offre le plus d'avantages.

Action sur les corps en dissolution. — Ce serait une grave erreur de croire que l'effet des filtres est purement mécanique, qu'ils se bornent à séparer par tamisage les impuretés visibles de l'eau. Les matières filtrantes exercent en outre une influence importante sur les principes dissous dans l'eau, en vertu des lois de l'attraction moléculaire.

Presque tous les corps solides, et probablement tous, jouissent en effet de la propriété de condenser les gaz. (On connaît l'effet du platine sur l'hydrogène. L'action du palladium sur le même gaz, récemment découverte par Graham, constitue un phénomène du même genre encore plus frappant). Les corps pos-

sèdent également la propriété de retenir à leur surface et de précipiter par attraction les matières solides en dissolution dans les liquides et notamment dans l'eau. Cette action moléculaire est assez énergique pour troubler l'équilibre des forces chimiques et déterminer certaines décompositions. Elle dépend essentiellement du volume du liquide dissolvant, de l'étendue des surfaces actives, et, toutes choses égales d'ailleurs, est beaucoup plus forte pour les corps poreux et divisés que pour les matières compactes et denses, plus faible pour les dissolutions très-étendues que pour les liquides concentrés. Enfin, la nature même des dissolutions et celle de la surface active interviennent dans ces questions. Ainsi l'effet est beaucoup plus sensible pour le platine et le palladium que pour les autres métaux, pour le charbon que pour le sable : le noir animal possède, surtout sous ce rapport, des propriétés très-marquées. Ces facultés d'absorption par les surfaces jouent d'ailleurs un rôle extrêmement important dans la plupart des phénomènes de la vie. C'est grâce à elles que les plantes s'assimilent les matières minérales que le sol renferme à l'état soluble. Ce sont elles qui permettent dans les arts d'effectuer la précipitation de diverses matières végétales ou animales, ce sont elles qu'on applique notamment dans la teinture, le tannage. Enfin, ce sont elles qui font la base des actions décolorantes et désinfectantes des charbons, etc. Dans la filtration des eaux, l'effet de ces forces n'est pas très-grand, d'une part, parce que la plupart des matières qu'on emploie comme filtres, telles que le sable, ne possèdent pas cette propriété absorbante à un haut degré ; d'autre part, parce que le volume de l'eau est considérable par rapport aux quantités de matières qu'elle tient en dissolution.

Action sur les matières organisées. — Le noir animal et les charbons organiques provenant de matières animales ont une action filtrante beaucoup plus marquée que le charbon de bois, mais ils sont d'un prix beaucoup plus élevé pour le travail en grand. Au contraire, le charbon de bois peut s'employer presque partout, et il est surtout utile lorsqu'on a à traiter des eaux chargées de matières organiques. Dans ces sortes d'eaux, en effet, quand elles séjournent quelque temps à l'air, surtout pendant l'été, les principes organiques se décomposent et passent à un état très-favorable au développement des végétations microscopiques et des infusoires dont l'air contient les germes. Ces êtres organisés se développent suivant les circonstances, tantôt au bout de quelques jours, tantôt en deux ou trois semaines seulement. La lumière et l'air sont favorables à la plupart de ces formations microscopiques; cependant plusieurs d'entre elles (parmi les infusoires) se trouvent mieux de l'obscurité, quelques variétés enfin, les algues, les infusoires verts et les entomostracées, ne peuvent prendre naissance à la lumière. Le froid et le mouvement de l'eau leur sont contraires. Elles se développent également moins bien dans les réservoirs profonds (3 mètres et plus) dont les couches inférieures sont trop éloignées de l'air et de la lumière.

D'après les recherches d'Arthur Hassal sur des eaux croupies, le papier à filtrer, le sable et les filtres en grés laissent passer les infusoires. Le charbon de bois ne laisse passer que les petites variétés ; le noir animal les retient complétement, de même que l'argile grasse ; quand on observe des eaux filtrées à l'aide de ces derniers agents, on remarque que les végétations microscopiques y reparaissent rapidement, et l'on doit en conclure qu'au moins leurs germes et leurs œufs ont échappé à l'action du filtre. Il est d'ailleurs important d'enlever à l'eau ces matières organisées, parce qu'elles provoquent des nausées, et les animaux qu'elles peuvent contenir, les larves, peuvent exercer sur la santé une influence fâcheuse. La difficulté du problème sera d'ailleurs justifiée, si

l'on rappelle que les globules de beurre, infiniment plus gros, que renferme le lait, ne peuvent en être séparés que par le noir animal et l'argile, mais traversent sans s'y arrêter le charbon de bois, le sable, etc.

Absorption des gaz. — La filtration enlève à l'eau une partie de sa teneur en gaz. Certains de ces principes sont absorbés par les matières du filtre, les autres sont mis en liberté par un effet analogue à celui que produisent tous les corps pulvérulents. Cette élimination, quand elle porte sur les gaz nuisibles de l'eau, est une bonne chose; elle est fâcheuse quand elle agit sur les gaz qui doivent s'y trouver normalement. D'après Hassal, l'hydrogène sulfuré des eaux d'égout putréfiées n'est absorbé d'une manière complète que par le charbon de bois et surtout par le noir animal; son élimination n'est que partielle avec l'argile, le sable, etc. L'acide carbonique est éliminé presque complétement par toutes les matières, qui réduisent également dans une forte proportion les autres gaz, savoir, l'oxygène et l'azote.

« Les conditions que doit remplir une eau filtrée dans une distribution publique sont : la clarté complète, l'absence de végétaux ou d'animaux microscopiques, l'élimination aussi complète que possible de matières organiques, surtout de matières en décomposition. L'eau doit enfin avoir une température convenable, être aussi douce que possible et contenir la proportion normale d'acide carbonique et des gaz de l'atmosphère. Ces diverses conditions ne sont guère remplies que par à peu près, et les dernières surtout, relatives à la présence des éléments gazeux, laissent souvent à désirer. Du reste, dans les distributions d'eau, on a beaucoup plus en vue de transformer l'eau mauvaise en eau utilisable qu'en eau de bonne qualité pour la boisson. »

Classification des filtres. — On distingue les filtres en filtres artificiels et filtres naturels. Nous les étudierons successivement, en examinant d'abord les grands filtres en usage dans les distributions d'eau et donnant ensuite quelques indications sur les filtres d'usage domestique.

FILTRES ARTIFICIELS

L'avantage d'une plus grande pureté dans l'eau des rivières considérée chimiquement, dit Arago, est bien plus que compensé par leur manque habituel de limpidité ; à chaque averse, les eaux torrentielles, pendant leur course précipitée, se chargent de terre végétale, de glaise, de graviers, de toutes sortes de détritus qu'elles arrachent au sol, et l'ensemble de ces matières est entraîné jusqu'au lit des rivières.

La Seine, lors des forts troubles, tient en suspension un demi-gramme de matière solide par litre et le Rhône 1 gramme.

Les eaux troubles des rivières ne paraissent point nuisibles à la santé; l'absorption des eaux limoneuses du Nil ne paraît point malsaine, cependant les médecins lui attribuent quelques affections des voies urinaires. Quoi qu'il en soit, il est certainement très-désagréable de boire des eaux chargées de limon, et on doit chercher le moyen de leur rendre toute la limpidité désirable.

Clarification par le repos. — Il semble, au premier abord, bien facile de rendre aux eaux leur limpidité altérée par les matières solides en suspension,

il suffit de les amener dans des bassins où on les laissera déposer quelque temps, et d'où on les décantera par un déversoir de superficie.

Mais, on reconnaît par l'expérience que la précipitation est très-lente; les plus grosses matières se précipitent très-vite, mais les poussières vaseuses ne sont pas encore tombées après plusieurs jours de repos.

C'est ce qu'on a reconnu avec les eaux de la Garonne et du Rhône : au bout de cinq ou six jours, on a une limpidité approximative, mais il faut dix jours au moins pour arriver à la limpidité parfaite.

Ce procédé est donc inapplicable dans une grande ville, à cause du nombre et de l'étendue des bassins, qu'il faudrait construire.

Il est, du reste, des eaux que le repos ne clarifie jamais; telles sont les eaux blanches de Versailles qui ont pris au contact de la marne une apparence laiteuse.

S'il fallait laisser séjourner de grandes masses d'eau pendant dix jours dans des bassins, la putréfaction et les végétations infusoires ne tarderaient pas à s'établir lors des chaleurs; on obtiendrait des eaux nauséabondes, désagréables et dangereuses.

Ainsi, il faut reconnaître avec Arago que le repos ne pourrait pas être adopté comme méthode définitive de clarification de l'eau destinée à l'alimentation des grandes villes; mais, il peut être considéré comme un moyen de la débarrasser de tout ce qu'elle renferme de plus lourd et de plus grossier. C'est sous ce point de vue seulement, que des récipients de dépôt ont été préconisés et établis en Angleterre et en France.

Filtres en sable et gravier. — Il existe plusieurs systèmes de filtres composés de couches successives de sable ou de gravier. Voici, d'après Darcy, la description des plus connus :

La figure 1 de la planche I représente une coupe d'un des filtres de Chelsea : *aa*, couche de sable très-fin; *bb*, couche de sable et de gravier; *cc*, couche de coquillages; *d*, couche de gros gravier dans laquelle sont construits les drains circulaires *e*,*e*,*e*,*e*. Ces drains sont en briques; ils ont trois pieds anglais ($0^m,914$) de diamètre extérieur, sur une brique d'épaisseur. Le filtre ou l'ensemble des couches repose sur un lit de glaise de $0^m,60$ d'épaisseur. (La figure 2 donne sur une plus grande échelle la disposition et l'épaisseur des couches.) Des ventouses ont été ménagées pour l'évacuation de l'air intérieur. L'ondulation des couches permet de mettre à sec une partie de la superficie pour en opérer le nettoiement, tout en laissant l'eau dans le creux des surfaces ondulées. Les joints des drains sont en partie faits en ciment, et en partie laissés ouverts ou sans ciment, pour la pénétration de l'eau dans l'intérieur. L'eau est admise à l'une des extrémités du filtre par neuf tuyaux; elle frappe d'abord contre des planches courbes qui servent à modérer son action sur la couche *aa* et à *l'étaler* uniformément sur le filtre. La Compagnie de Chelsea possède deux filtres pareils. La longueur de chacun de ces filtres est de 240 pieds anglais, soit 75 mètres et la largeur de 180, soit 55 mètres.

Filtre de Southwark. — Le système de filtrage adopté par la Compagnie de Southwark comprend à la fois des réservoirs de dépôt (settling reservoirs) et des filtres proprement dits. L'eau séjourne dans les réservoirs de dépôt avant d'arriver, par un écoulement de superficie, sur les filtres[1]. La figure 3 de la

[1] La Compagnie de Chelsea a également adopté aujourd'hui l'usage préparatoire des réservoirs de dépôts. Ces derniers sont au nombre de trois et présentent une superficie de 1 hectare 1/2.

Je ne reviendrai point sur les inconvénients qui résultent du séjournement prolongé de l'eau

planche I représente une coupe des réservoirs de dépôt de la Compagnie de Southwark; leur superficie totale est de 5 acres anglais, ou de 3400 mètres; leur profondeur de 13 pieds 6 pouces anglais, ou 3^m,965; le fond de ces réservoirs présente une inclinaison, descendant à un caniveau central demi-circulaire coté *b* : il est construit en maçonnerie de briques et ciment; son diamètre est de 6 pieds anglais 1^m,815. Lors du nettoiement du réservoir, la vase déposée sur le fond est balayée dans le caniveau, puis entraînée au dehors par un courant d'eau artificiel.

Quant aux filtres, ils sont construits de la même manière que ceux de la Compagnie de Chelsea, que nous venons de décrire, et sont au nombre de deux : l'un a une superficie de 2,900 mètres carrés; et l'autre, de 7,840 mètres. La quantité d'eau filtrée, sous une charge variant de 1^m,20 à 1^m,30, est de 30 à 35,000 mètres cubes par vingt-quatre heures (c'est-à-dire 4 mètres cubes par mètre carré et par jour). La composition des couches de ces filtres est indiquée figure 4. L'eau des réservoirs de dépôt A, que l'on a toujours le soin de prendre à la superficie, est versée sur la surface des filtres C, puis, traversant ces derniers, elle pénètre dans les grands drains circulaires en briques, d'où elle se rend clarifiée dans le puisard des machines à vapeur D.

Filtre de Thomas Ditton. — L'appareil de Thomas Ditton se compose de quatre filtres, présentant une superficie totale de 2,900 mètres carrés. Leur niveau est inférieur à celui de la Tamise, dont les eaux se répandent sur les filtres, en passant par une série de tuyaux en fonte munis chacun d'un robinet vanne.

Voici quelques détails sur le mode de construction de chacun de ces filtres. Sur le fond d'une excavation pratiquée dans le sol, a été construite une série de murs parallèles, sur lesquels reposent de fortes dalles en ardoise du pays de Galles; elles sont placées de champ et assez rapprochées, pour que les cailloux superposés ne puissent passer dans l'intervalle laissé entre elles. On voit ainsi qu'il existe, au-dessous du lit de filtration, un véritable réservoir de 1^m,30 de hauteur. La figure 5 donne la composition des couches filtrantes de l'appareil de Thomas Ditton. Il fonctionne sous une charge moyenne de 2^m,50, et produit en vingt-quatre heures 7,850 litres par mètre carré.

Le nettoiement du filtre a lieu trente-six fois par an; chaque opération nécessite l'emploi de vingt-cinq hommes, pendant cinq heures environ, et la quantité de sable enlevé est d'environ 1 centimètre de hauteur. Lorsque l'épaisseur de la couche de sable fin est réduite de moitié (c'est-à-dire de 0^m,90 à 0^m,45), on recharge la couche de manière à la ramener à sa puissance primitive de 0^m,90. Le sable enlevé est lavé à grande eau et sert alors à recharger le filtre.

Établissement d'York. — Deux machines de quarante chevaux chacune élèvent l'eau de la rivière, dans deux bassins de dépôt de 75 mètres de longueur sur 50 mètres de largeur chacun, comme l'indique la figure 6. Les eaux arrivent dans l'un et dans l'autre de ces bassins par les points E et E', au moyen de deux robinets-vannes AA, que l'on ouvre et ferme alternativement. On laisse reposer l'eau, et ensuite on la dirige sur les filtres (*fig.* 7), en ouvrant successivement deux robinets-vannes, placés en F, à 0^m,50 au-dessus du fond des bassins d'épuration, pour ne pas entraîner le limon et les dépôts. Ce limon peut être extrait des bassins d'épuration par un trou O, placé au centre de chaque

dans ces vastes réservoirs, où sous l'influence de l'action solaire, la vie végétale et la vie animale, se développant avec activité, altèrent profondément la pureté initiale du liquide.

bassin, au point le plus bas du radier, et réuni par un tuyau à un puits B, qui, lui-même communique à la rivière au moyen d'un robinet-vanne. Ces tuyaux ont $0^m,30$ de diamètre. Le puits porte, vers sa partie supérieure, un orifice rectangulaire, qui sert de déversoir de superficie aux bassins d'épuration. Les eaux arrivent dans ces bassins, par la partie supérieure, au moyen de tuyaux de $0^m,50$ de diamètre.

Pour ne pas dégrader les talus, qui sont cependant perreyés, on fait couler les eaux sur un conduit en pierre de taille CE, qui se termine au fond par une grande dalle. Ces bassins ont des talus intérieurs et extérieurs inclinés à 1^m50 de base pour 1 mètre de hauteur. Ils sont perreyés en petits matériaux et ont environ de 6 à 7 mètres de profondeur. Le fond est réglé en pente faible dans tous les sens vers le centre, afin que les eaux et le limon affluent vers le point O.

Les eaux encore louches des bassins d'épuration peuvent être dirigées, au moyen du robinet vanne F, dans un quelconque des trois filtres E′, E″, E‴. Ces bassins sont revêtus d'une couche de béton de $0^m,30$ environ. Au centre et dans l'axe longitudinal, existe un drain en briques de 22 pouces anglais ($0^m,55$ environ) de diamètre. Ce tuyau principal se raccorde avec de petits tuyaux en poterie, parallèles entre eux, diagonalement disposés et percés de trous. Ces derniers eux-mêmes communiquent par leurs extrémités avec deux drains en poterie placés parallèlement aux drains centraux sur les bords des bassins.

Cet ensemble de tuyaux est recouvert par deux couches, l'une inférieure en gravier de 4 pieds anglais d'épaisseur, l'autre en sable fin, d'une épaisseur égale. Le gravier et le sable sont préalablement disposés chacun en deux couches, de manière à graduer la finesse des matières depuis la base jusqu'au sommet.

L'eau entre à la surface du sable fin (qui est disposé par petites vallées) au moyen de trois tubes en fonte (*fig.* 8), aboutissant dans des boîtes en bois, pour éviter l'affouillement du sable. En avant de ces boîtes, il existe des bondes de fond, qui peuvent s'ouvrir à volonté, vider rapidement l'eau et mettre le filtre à sec.

Les galeries inférieures en briques communiquent avec une galerie GG fig. 7, qui va aboutir à un puits, d'où les machines les élèvent dans un réservoir supérieur placé à une distance de quelques centaines de mètres des filtres, et d'un niveau supérieur à celui des édifices les plus élevés de la ville. Des tuyaux verticaux en fonte communiquent avec les galeries en briques des filtres; ils permettent le dégagement de l'air au moment de la mise en charge. Enfin des conduites en fonte communiquent d'un côté avec le fond du filtre et de l'autre avec la rivière, et munies de robinets vannes, donnent le moyen de vider à volonté les filtres.

Établissement de Hull: — Cet établissement se compose (*fig.* 9) : 1° d'un grand bassin de dépôt de 300 mètres environ de longueur et de 25 mètres de largeur, terminé par deux demi-cercles;

2° D'un bassin de filtration de même dimension;

3° D'une prise d'eau à la rivière qui permet, au moyen de vannes, de faire entrer l'eau soit dans l'un, soit dans l'autre de ces bassins;

4° De deux machines à vapeur à simple effet, de la force de soixante-cinq chevaux chacune, élevant les eaux à une hauteur de 160 à 175 pieds anglais;

5° D'une tour contenant deux conduites en fonte, par l'une desquelles l'eau

monte d'un côté pour redescendre de l'autre, afin d'alimenter la ville [1].

Le bassin de filtrage se compose d'un rectangle de 300 mètres de longueur et de 25 mètres de largeur totale, terminé par deux demi-cercles avec talus à $1^m,50$ de base pour 1 mètre de hauteur. Une couche (*fig.* 10) de 4 à 5 pieds anglais, dont la partie supérieure est en sable et la partie inférieure en gravier, recouvre une galerie centrale et des galeries transversales toutes perméables. La hauteur de l'eau dans le bassin de filtrage est de $1^m,10$; elle peut aller à $1^m,30$ ou $1^m,40$. La différence de niveau de l'eau filtrée et de l'eau trouble n'était que de $1^m,45$ le jour où M. de Montricher, qui a recueilli les renseignements relatifs aux appareils de York et de Hull, a visité cet établissement. Des petits puits (*fig.* 10) laissent communiquer la galerie inférieure avec l'air libre.

Le filtre peut marcher environ deux mois sans être nettoyé; il faut une journée de trente hommes pour faire cette opération. On enlève une petite croûte de limon; quand on a fait disparaître une certaine couche de sable, on la remplace par du sable nouveau, de manière à établir l'épaisseur primitive de la couche filtrante. Pendant qu'on nettoie le filtre, on donne à la ville de l'eau du bassin de dépôt non filtrée. Le sable est entièrement de niveau dans ces filtres; il n'y a pas de vallées comme dans les autres filtres.

La population de Hull est de 100,000 âmes environ; la quantité d'eau fournie étant de 200 litres par seconde, soit 172,280,000 litres par vingt-quatre heures, il en résulte qu'on distribue 172 lit. 80 par habitant.

Le système de clarification adopté pour les eaux de Hull démontre la possibilité d'opérer le filtrage sur une très-grande échelle.

Écosse. — Filtre de Paisley. — Dans les filtres que nous venons de décrire, la clarification de l'eau s'opère par son passage spontané à travers les couches de sable. Ils sont appelés pour cette raison, par les ingénieurs anglais, *filters self acting*. Ces derniers ont cherché aussi des filtres se nettoyant eux-mêmes, ou *filters self cleansing*. La description du filtre de Paisley, construit par M. Thom, nous fera connaître le moyen imaginé par cet ingénieur pour obtenir le résultat cherché. Ce filtre a 100 pieds anglais de longueur sur 60 de largeur, c'est-à-dire une superficie de 660 mètres carrés environ, laquelle est divisée en trois compartiments pouvant fonctionner séparément. Voici le mode de construction de l'appareil.

Il a été pratiqué une excavation de 6 à 8 pieds anglais de profondeur ($2^m,40$); des murs de revêtement l'environnent, et sur le fond a été appliquée une couche de terre glaise de $0^m,30$ d'épaisseur, revêtue d'un pavage cimenté; des briques posées de champ recouvrent ce pavage; leurs rangs parallèles, qui laissent entre eux un intervalle libre de 6 millimètres, sont recouverts par une surface formée de tuiles plates perforées d'une infinité de petits trous d'environ $2^{mm},50$ de diamètre. Sur cette espèce d'écumoire en tuiles plates se trouvent étalées six couches de gravier ayant chacune 25 millimètres d'épaisseur et dont la ténuité va croissant jusqu'à la couche supérieure, qui est composée de gravier très-fin ou de sable très-gros. Par dessus ces six couches est une épaisseur de $0^m,45$ de sable très-fin et très-vif. Enfin une dernière couche de 15 centimètres de puissance, composée d'un volume de charbon animal, sur neuf volumes de sable

[1] Ces espèces de châteaux d'eau, fort usités en Angleterre, ont pour objet de faire disparaître ou du moins d'atténuer fortement la difficulté qui résulte de l'inertie de la masse d'eau contenue dans la conduite ascensionnelle. On les remplace aujourd'hui, avec avantage et moins de dépense, par de grands réservoirs d'air.

vif et fin, complète ce filtre. M. Thom a remplacé plus tard le charbon animal par le trap rock (en poudre) provenant des collines qui dominent la ville de Greenock.

Les fig. 11, 12 et 13, pl. I, représentent en plan et en coupes les dispositons générales des filtres de Paisley. AA, caniveau en pierre amenant l'eau au filtre; BB, tuyaux verticaux en fonte ayant chacun deux orifices d'écoulement, l'un qui déverse l'eau sur la superficie du filtre, l'autre qui introduit le liquide au-dessous des couches filtrantes; chacun de ces deux orifices est muni d'une vanne d'arrêt. CCC, passages de l'eau filtrée quittant l'appareil; ils sont également munis de vannes. DD, caniveau conduisant l'eau filtrée dans le grand réservoir E. FF, passages pour l'écoulement de l'eau pendant le nettoiement du filtre. L'opération du nettoiement a lieu en fermant les orifices des tuyaux BB, qui déversent l'eau sur la superficie et, en ouvrant les vannes qui admettent l'eau au-dessous des couches filtrantes. Les vannes des passages CC sont fermées et celles des passages FF ouvertes. L'eau bouillonne à travers les couches de gravier et de sable, en passant de bas en haut, les remue profondément et s'écoule par les orifices F, emportant les impuretés déposées dans les interstices du sable. Lorsque cette eau sort pure et limpide, l'opération est terminée. GG, caniveau par lequel s'écoule le liquide chargé d'impuretés.

Outre ce moyen de nettoiement employé une fois par mois, on enlève, avec de larges planches munies d'un manche, une épaisseur de sable de 1 centimètre. Le filtre n'est rechargé de sable qu'une fois ou deux par an; deux hommes en une demi-journée suffisent pour l'enlèvement du sable, et aussi pour recharger le filtre. On compte environ cinquante journées d'hommes employés à ce travail dans le courant de l'année, et la quantité de sable chargé dans le même temps est en moyenne de 180 mètres cubes.

La quantité d'eau filtrée par vingt-quatre heures est en moyenne de 106,682 pieds anglais, soit 3,019 mètres cubes, soit environ 4,500 litres par mètre carré pour vingt-quatre heures. Le coût de cet appareil a été un peu moins de 600 livres sterling, soit 15,000 francs.

Les eaux, avant de s'écouler sur le filtre, séjournent dans deux réservoirs de dépôt, pour laisser le limon se précipiter avant la filtration; l'un de ces réservoirs a 16 hectares de superficie sur 9 mètres de profondeur, l'autre 2 hectares sur même profondeur.

Filtres de Marseille. — Ces filtres sont couverts; le bassin de filtrage se compose de deux parties :

La superficie de l'une est.	4,800 mètres.
Celle de l'autre.	4,000 —
Total.	8,800 —

pour la superficie filtrante. Ils produisent moyennement un litre et demi par seconde, par 10 mètres carrés, soit 13 mètres cubes par vingt-quatre heures et par mètre.

L'épaisseur du lit de filtration est de $0^m,80$, savoir :

Sable très-fin de Montredon.	$0^m,30$
Sable moyen de Goudes.	$0^m,08$
Gros sable de Rion.	$0^m,18$
Petit gravier du Prado.	$0^m,12$
Pierres concassées passant par un anneau de $0^m,06$.	$0^m,12$
Total.	$0^m,80$

Cette couche est supportée par des voûtes en moëllons traversées par des tuyaux en poterie de $0^m,04$ de diamètre. C'est par ces orifices que les eaux filtrées tombent dans le réservoir inférieur ; c'est aussi par leur moyen que s'établit le courant ascensionnel dont je vais parler.

Le nettoiement de ces filtres s'effectue tous les huit ou dix jours, suivant que les eaux de la Durance ont été plus ou moins chargées dans cette période. On a établi sur le parcours du canal, en amont des filtres, trois ou quatre grands bassins d'épuration où les eaux déposent la plus grande partie de leur limon; les eaux de la Durance sont parfois tellement troubles que sans cette précaution les filtres seraient engorgés, en cinq ou six heures, à un point tel que le nettoiement par un courant dirigé de bas en haut ne serait plus praticable.

Les filtres pourraient fonctionner plus de huit ou dix jours, car au bout de ce temps ils fournissent encore plus de 0 lit. 13 par seconde et par mètre carré de surface, produit réclamé par les besoins de la distribution, mais l'expérience a démontré que le nettoiement est d'autant plus facile que la couche de vase séjourne moins longtemps sur le sable. La charge sur les filtres est variable; elle est d'abord très-faible au commencement de l'opération, $0^m,40$; mais on l'augmente successivement au fur et à mesure que les filtres s'engorgent, et elle est d'environ $0^m,80$ à 1 mètre à la fin de l'opération.

Pour que le nettoiement s'opère complétement par un courant de bas en haut, il faut que le filtre débite dans ce sens 0 lit. 30 à 0 lit. 35 par seconde et par mètre carré, ce débit exige une sous-pression d'environ $0^m,60$ de hauteur d'eau. Alors le limon est déblayé et emporté rapidement dans les canaux de décharge. Pour protéger la surface du filtre contre les ravinements pendant le lavage, on a soin de disposer les lieux de manière à maintenir une tranche d'eau de $0^m,10$ d'épaisseur sur la surface du sable.

Lorsque le volume d'eau arrivant de bas en haut est, comme il est dit ci-dessus, de 0 lit. 30 à 0 lit. 35 par seconde et par mètre carré, le sable est parfaitement nettoyé dans quatre ou cinq heures au plus. La tranche d'eau qu'on y maintient le garantit si complétement, qu'on ne s'est pas aperçu, après un an de service, que le niveau primitif du sable se soit abaissé. Mais si le volume d'eau, arrivant de bas en haut, est réduit à 0 lit. 20 par seconde et par mètre carré, on est obligé de favoriser l'enlèvement du limon, en le remuant par les moyens déjà décrits dans les filtres anglais.

Lorsqu'après le nettoiement on remet l'eau sur les filtres, elle conserve une teinte ocreuse pendant les premières heures ; le courant de bas en haut a-t-il déposé dans le filtre, pendant la durée de l'opération, une légère couche de limon? ou bien encore le sable soulevé par la sous-pression présente-t-il à l'eau des conduits plus larges qu'après son tassement par une action en sens inverse? Quoi qu'il en soit, au bout de huit à dix heures au plus, l'eau est redevenue très-limpide.

En résumé, on peut déduire de cette description des principaux filtres d'Angleterre et de France les faits suivants :

1° En ce qui concerne la composition des filtres, ils présentent deux couches principales : l'une inférieure en gravier, servant de support au filtre ; l'autre en sable fin, formant le filtre proprement dit. L'épaisseur de la première varie entre $0^m,30$ à $0^m,90$, celle de la seconde entre $0^m,60$ et $0^m,90$;

2° En ce qui concerne les eaux filtrées, elles sont recueillies, à l'exception du mode suivi dans les filtres de Paisley et de Thomas Ditton, par un système de tuyaux de drainage généralement posés comme il suit : l'un central, dans le sens

de la longueur du filtre, les autres à peu près normaux à ce dernier et se raccordant avec lui. Je crois le premier mode préférable : en effet, l'eau filtrée doit éprouver moins de difficulté à descendre directement dans le réservoir inférieur qu'à pénétrer dans les drains ;

3° En ce qui concerne le débit des filtres, il varie entre 3 mètres cubes et 13 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures, ainsi qu'il résulte du tableau ci-dessous :

N°s D'ORDRE	DÉSIGNATION DES FILTRES	SUPERFICIE DES FILTRES	ÉPAISSEUR D'EAU SUR LE FILTRE	QUANTITÉ FILTRÉE EN VINGT-QUATRE HEURES	
				QUANTITÉ TOTALE	PAR MÈTRE CARRÉ
		mètres	mètres	m. c.	m. c.
1	Chelsea (Londres).	8,040	1,25	44,000	5,4
2	Grand-Junction (Id.).	600	1 à 1,25	18,000	3,00
3	Southwark et Vauxhall (Id.).	10,800	1,50	3,150	4,00
4	Lambeth : Thomas Ditton (Id.). . .	2,880	2,50	22,500	8,00
5	Paisley (Écosse).	660	0,10 à 0,20	7,000	10,00
6	Marseille.	8,800	0,40	114,000	13,00

4° En ce qui touche le nettoyage des filtres, il suffit pour l'obtenir d'enlever une épaisseur de sable égale à 1 ou 2 centimètres ; l'expérience apprend, en effet, qu'après le passage d'une grande quantité d'eau, très-chargée de matières étrangères en suspension, au travers d'une couche de sable, ces matières, quelque ténues qu'elles soient, ne pénètrent d'une façon notable qu'à 2 centimètres au maximum au-dessous de la surface de cette couche, et qu'à 15 centimètres de cette même surface il est impossible de découvrir la moindre souillure de ce sable.

De là dérivent deux conséquences : 1° l'inutilité de donner à la couche de sable plus de $0^m,20$ d'épaisseur, pourvu qu'on ait soin d'en renouveler en temps utile la surface; 2° la possibilité de réduire la couche support à quelques centimètres.

Ainsi M. Sagey, ingénieur des mines, qui a obtenu à l'Exposition universelle une médaille d'or pour l'application de procédés ingénieux à la ventilation des maisons centrales, m'a dit avoir établi au château de Spoir, près de Chartres, un filtre qui fonctionne très-bien et dont l'épaisseur totale est de $0^m,18$, savoir :

Couche support.	$0^m,08$
Couche filtrante.	$0^m,10$
Total.	$0^m,18$

Les eaux, il est vrai, ne sont pas très-chargées de limon.

« **Filtration au charbon.** — Avant de traiter de l'emploi du charbon dans la filtration en grand, nous pourrions nous demander : *Une semblable filtration existe-t-elle? est-elle praticable?* Cette question paraîtra plus que singulière, alors que, depuis un demi-siècle, un grand établissement fonctionne à Paris, sous les yeux de l'administration, avec l'approbation de plusieurs sociétés sa-

vantes, et que l'on y fait grand bruit de l'application, à la purification de l'eau de la Seine, des découvertes de Lowitz, de Bertholet, de Saussure, etc., qui, comme on le sait, ont fait connaître les propriétés décolorantes et désinfectantes du charbon. La question, avons-nous dit, paraîtra singulière, et, cependant, il faut se résigner à accepter la réponse, qui *est négative*, et à reconnaître avec M. Soubeiran *qu'il n'existe point de filtre à charbon proprement dit, car la dépense qu'il occasionnerait serait telle que l'eau ne pourrait être livrée qu'à un prix très-élevé.* Hâtons-nous d'ajouter que nous ne prétendons nullement incriminer la bonne foi des inventeurs du procédé mis en pratique à l'établissement du quai des Célestins. Ils se sont laissé abuser par une illusion qui ne peut plus être partagée par les savants. Nous emprunterons les principaux arguments de la discussion à laquelle nous allons nous livrer à un rapport rédigé par M. Gaultier de Claubry, membre avec MM. H. Royer-Collard et Donné d'une commission chargée par la compagnie du filtrage Fonvielle de se livrer à des recherches sur l'utilité de l'*emploi du charbon pour le filtrage en grand des eaux destinées aux usages domestiques.* Il résulte des expériences de la commission que le pouvoir désinfectant du charbon s'exerce dans des limites plus rapprochées qu'on ne le croit généralement. Ainsi, suivant que l'eau à désinfecter est très-fétide ou seulement peu odorante, le poids du charbon à employer variera de 1/150 à 1/600 de celui de l'eau. « Si nous admettons pour limite extrême qu'un kilogramme « de charbon peut dépurer complétement 1,000 litres ou 10 hectolitres d'eau à « peine odorante, nous aurons fait une part très-large à cette action. »

« Si nous appliquons cette évaluation aux appareils de filtrage, nous arriverons à des chiffres qui mettent en évidence l'impossibilité de l'application du charbon à la purification des eaux sur une grande échelle. La ville de Paris dépense aujourd'hui un volume d'eau supérieur à 300 *pouces du fontainier*, soit 600,000 hectolitres (vers 1860). Supposons que la portion d'eau vendue par les compagnies qui emploient des filtres au charbon soit égale à la *soixantième partie* de cette quantité, le chiffre de cette fraction s'élèvera encore à 10,000 hectolitres, qui nécessiteront l'emploi de 1,000 kilogrammes de charbon, c'est-à-dire une dépense quotidienne de 300 francs environ. Cette dépense pourra être recouvrée en partie, il est vrai, par le réemploi du charbon après épuration, mais elle sera toujours beaucoup trop considérable pour qu'on n'admette pas *à priori* l'opinion émise par M. Gaultier de Claubry « que dans les filtres montés au charbon, soit « dans les grands établissements, soit dans les fontaines domestiques, la pro- « portion de charbon employé n'a aucun rapport avec la masse d'eau qu'il s'a- « git de dépurer, et que, si ce corps exerce dans les premiers instants une ac- « tion désinfectante, il n'agit bientôt plus que comme matière filtrante. »

« Nous ne devons pas omettre de consigner ici le fait important signalé dans son rapport par M. Gaultier de Claubry, de l'absorption d'une partie de l'air tenu en dissolution dans l'eau par le seul contact de ce liquide avec le charbon. Ce serait là un inconvénient de l'emploi de ce corps comme agent de filtration.

« Quoi qu'il en soit, les filtres de l'établissement du quai des Célestins contiennent de la *braise* de boulanger, dont les pouvoirs désinfectant et décolorant sont inférieurs à ceux du *noir d'os;* il paraît qu'on lave ces filtres six à sept fois par mois, et qu'on se borne à soumettre le charbon à l'*aération* pendant quelques jours, pratiques insuffisantes pour enlever la portion notable de principes organiques dont ce corps absorbant s'est pénétré et lui rendre ses propriétés premières. »

Il résulte de cette discussion qu'on ne peut songer à l'emploi du charbon pour la purification des grandes masses d'eau.

Prix de revient du filtrage. — Dans les filtres de l'East London Company, le prix de revient de la filtration de 1,000 mètres cubes est de 8 francs environ, ou de 2 francs si on ne fait pas entrer en ligne les intérêts du capital d'installation.

L'entretien et l'exploitation des filtres de Chelsea reviennent à 75 francs par jour pour 22,000 mètres cubes d'eau filtrée. Ainsi, on a pour la dépense par 1,000 mètres cubes d'eau filtrée, 3 fr. 75, non compris l'intérêt du capital de premier établissement. A Southwarck, ce prix de revient n'est que de 2 fr. 75.

Filtre de Dunkerque. — M. Pauwels, conducteur des ponts et chaussées, a, dans une brochure récente, rendu compte de la construction du filtre établi pour la distribution d'eau de Dunkerque.

Le volume d'eau à filtrer s'élevant à 1,500 mètres cubes par vingt-quatre heures, comme on peut compter sur un débit de 4 mètres cubes par mètre carré de filtre, il faut pouvoir disposer d'une surface filtrante de 375 mètres carrés.

On a créé quatre compartiments de filtrage de 125 mètres chacun, de sorte que l'un de ces compartiments est toujours en chômage et soumis à l'opération du nettoyage, pendant que les trois autres fonctionnent.

Le système adopté est analogue à celui de Paisley, précédemment décrit; M. Pauwels, conformément aux indications de Darcy, a seulement diminué l'épaisseur des couches filtrantes, ce qui est sans inconvénient, puisque l'activité du filtre ne se manifeste que sur les couches supérieures, c'est-à-dire sur une faible partie de la hauteur.

Le projet primitif comportait :

1° Une couche support.	Briques de champ.	$0^m,12$	$0^m,30$
	Tuiles plates perforées.	$0^m,03$	
	Gravier.	$0^m,15$	
2° Une couche filtrante en sable.			$0^m,20$
		Total. . . .	$0^m,50$

Mais le sable était entraîné en partie dans les interstices du gravier, ce qui amenait l'obstruction des cavités inférieures et paralysait le fonctionnement du filtre.

En exécution, voici ce qui a été réalisé :

1° Couche support. . . .	Briques de champ.		$0^m,13$	$0^m,46$
	Carreaux perforés en ciment de Portland.		$0^m,03$	
	Galets de Calais.		$0^m,15$	
	Escarbilles de moyenne gross., lavées	$0^m,05$		
	— fines —	$0^m,05$	$0^m,15$	
	— très-fines —	$0^m,05$		
2° Couche filtrante. — Sable des dunes.				$0^m,20$
			Total.	$0^m,66$

Ce système a donné un produit exceptionnel de 8 mètres cubes d'eau environ par mètre carré de surface et par 12 heures de fonctionnement.

Les briques sont posées de champ sur le radier, elles laissent entre elles $0^m,03$ de distance libre.

Les carreaux de ciment, de $0^m,27$ de côté sur $0^m,03$ de hauteur, portent chacun 545 trous de $0^m,0025$ de diamètre.

La charge d'eau sur la surface libre du filtre est d'environ $2^m,50$; une charge de $0^m,40$ à $0^m,80$ étant suffisante, on peut laisser les eaux s'élever dans le puisard à $1^m,50$ au moins au-dessus du radier du filtre. Il faut remarquer, du reste, que si l'on conservait la pression de $2^m,50$, elle serait trop considérable et finirait par nuire au débit du filtre en comprimant les matières filtrantes.

Pour le nettoiement d'un des bassins de filtrage, on ferme les vannes d'amenée et d'écoulement ; les eaux du canal sont introduites sous le filtre par une vanne spéciale communiquant avec un aqueduc d'amenée, elles traversent le filtre de bas en haut, enlèvent les impuretés et les eaux troubles s'écoulent par un déversoir de superficie.

Cette opération se renouvelle une fois par mois ; le sable est remplacé deux fois par an sur une épaisseur de deux centimètres.

Nous aurons l'occasion plus loin de parler de cette distribution d'eau de Dunkerque et de la dépense qu'elle a occasionnée.

Filtres de Berlin. — La ville de Berlin est alimentée par les eaux de la Sprée, que des machines à vapeur et des pompes élèvent jusque dans des bassins de filtrage.

Un bassin de filtration repose sur une couche d'argile battue : le fond en est formé par une couche de béton de ciment de $0^m,15$; les eaux filtrées tombent sur ce fond qui présente une rigole centrale où les eaux s'accumulent pour s'écouler au dehors.

L'épaisseur des couches filtrantes est de $1^m,40$; on trouve à la surface du sable moyen, puis viennent des graviers grossiers, des cailloux de la grosseur du poing et des pierres qui entourent les collecteurs.

Cette installation est due à l'ingénieur Crampton.

Filtres à grand débit. — Pour obtenir des filtres à grand débit, tout en conservant les couches filtrantes horizontales, le plus simple moyen est d'augmenter la charge effective sur la surface du filtre. Mais il y a inconvénient à

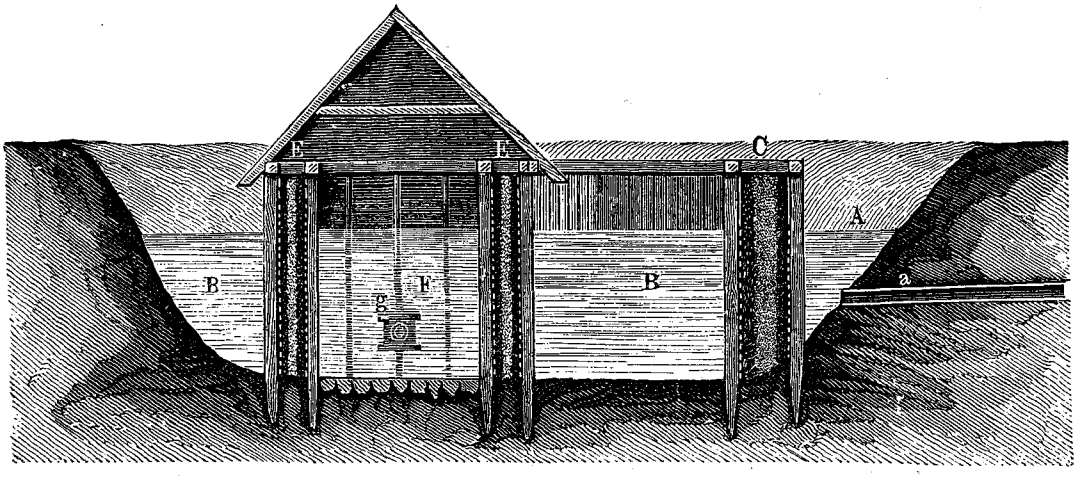

Fig. 18.

agir ainsi lorsque les matières filtrantes sont compressibles, parce qu'alors les pores se trouvent obstruées et on obtient un effet contraire à celui qu'on cherchait.

Le filtre Maurros, formé par du sable comprimé entre deux plaques de fonte

percées de trous, arrivait à donner un débit de 75 mètres cubes par mètre carré et par 24 heures sous une charge de $3^m,80$. Mais ce filtre était d'un prix élevé, difficile à nettoyer et à entretenir et on l'a abandonné.

Filtres à couches de sable verticales. — On est arrivé à établir des filtres de grand débit en se servant de couches filtrantes verticales, disposées comme le montre la figure 18, extraite de la chimie de Knapp.

L'eau arrive par la conduite *a*, remplit le premier bassin A, passe dans le bassin intérieur B en traversant un filtre vertical C, traverse un second filtre vertical E pour se rendre dans un second bassin intérieur, d'où l'extrait la pompe *g*.

Les couches filtrantes sont construites comme des batardeaux, le massif intérieur comprend un noyau central en sable maintenu sur les deux côtés par du gravier; le sable ne peut être mis en contact avec les parois, parce qu'il s'écoulerait par les interstices.

L'épaisseur du premier batardeau C est de $0^m,80$ et celle du second $0^m,50$. Un filtre de ce genre peut arriver à donner 10 mètres cubes d'eau clarifiée par mètre carré et par jour.

FILTRES NATURELS

Les filtres naturels consistent dans l'établissement de galeries perméables au milieu des alluvions de la rivière ou du fleuve dont on veut clarifier les eaux. Ces galeries, que l'on prolonge suffisamment pour obtenir la quantité d'eau voulue, versent leur produit dans le puisard des machines, d'où les eaux sont extraites par des pompes.

La théorie de ces filtres est très-simple et leur succès assuré, lorsque toutefois les alluvions ne sont pas vaseuses et que la vitesse du liquide dans le lit naturel est assez grande pour enlever les troubles qui se déposent sur les parois du lit, ou même pour renouveler la couche de sable. On a vu, en effet, dans les filtres artificiels, que les dépôts restaient toujours à la superficie.

Filtre naturel de Nottingham. — Au bord de la rivière de Trent, à 1,600 mètres de Nottingham, a été creusé, dans un grand dépôt de sable, un vaste réservoir dont les murs de revêtement sont en pierres sèches. La distance entre la paroi la plus rapprochée et la rivière est de 45 mètres. L'eau, traversant cette couche, arrive parfaitement pure au réservoir, en passant par les joints sans mortier des murs de revêtement. Ce réservoir n'étant pas voûté est soumis à l'influence des rayons solaires; aussi la végétation et la vie animale s'y développent-elles parfois en été. Dans cette saison, un nettoiement a lieu toutes les trois semaines et en hiver une fois tous les deux mois environ : on y procède en pompant l'eau hors du réservoir et en balayant le fond et les côtés de cet ouvrage.

Filtres de Toulouse. — Les filtres de Toulouse, décrits par d'Aubuisson dans son *Histoire de l'établissement des fontaines à Toulouse*, sont établis dans un banc d'alluvion que la Garonne a déposé au pied du cours Dillon (fig. 2, pl. 5 et 6) et qui est principalement composé de gravier et de sable, entremêlés souvent de cailloux et en quelques endroits d'un limon vaseux.

Le premier filtre se composait d'un fossé accédant à une excavation creusée

dans le massif d'alluvion, de 108 mètres de long sur 10 mètres de large, mise à l'abri des inondations par une forte digue qui l'entourait de toutes parts. Le filtre étant laissé à découvert, il s'y développa bientôt des végétations de toutes natures ; des reptiles mêmes y parurent, de sorte que l'eau devint infecte. D'Aubuisson fit alors nettoyer le fond du filtre, on le combla ensuite avec des cailloux, en établissant dans la longueur de l'excavation un petit aqueduc en briques simplement superposées sans mortier.

Sur le massif de remplissage en cailloux et graviers on plaça de la terre franche et on sema du gazon. Ainsi rétabli, le filtre donna des eaux limpides d'une saveur agréable, vives et fraîches comme des eaux de montagne.

Ce premier filtre ne fournissant que 100 pouces d'eau, au lieu de 200 qu'il fallait, on en établit un second; mais, comme on voulait augmenter le produit, on se rapprocha trop de la rivière, on traversa une bande de terrain vaseux, on n'obtint que de l'eau chaude en été, qui développa dans les conduites une végétation de petites plantes chevelues. Les eaux du second filtre, mélangées à celles du premier, en amoindrissaient la qualité.

Aussi dut-on recourir à un troisième filtre, rendu nécessaire, du reste, par l'accroissement de la consommation. On établit la galerie *efghi* de 250 mètres de long, parallèle au bord de la rivière, à une distance de 30 mètres d'abord et de 50 mètres ensuite. Le fond en est à $1^m,14$ au-dessous des basses eaux de la rivière ; sur ce fond on a établi (fig. 6, pl. 2) une galerie de $1^m,50$ sur $0^m,60$, consistant en deux murs de briques simplement superposées, recouverts en dalles de pierre. L'espace compris entre la galerie et les parois de l'excavation est rempli de gros cailloux bien lavés ; au-dessus on répand une couche de gravier de $0^m,66$ de hauteur, puis on comble avec de la terre sablonneuse extraite de la fouille et on sème du gazon à la superficie.

Lorsque la Garonne déborde, l'afflux des eaux dans les filtres se fait sans doute de haut en bas, et les eaux qu'on recueille restent louches.

Galeries filtrantes de Lyon — On trouvera la description complète des galeries filtrantes de Lyon dans l'ouvrage de M. l'ingénieur Dumont.

La première galerie de filtration est en béton, fait avec du ciment de Pouilly; le radier est en gravier et sable naturel, établi à 3 mètres au-dessous de l'étiage du Rhône. La longueur de la galerie est de 150 mètres, sa largeur dans œuvre de 5 mètres. Elle a coûté 1,200 francs par mètre courant.

La galerie étant insuffisante, on lui a accolé un bassin filtrant de 44 mètres sur 38 mètres, couvert par une série de voûtes d'arêtes en maçonnerie de moellons supportées par des piliers en même maçonnerie et par des culées fondées seulement au niveau de l'étiage.

La surface filtrante totale du bassin et de la galerie était de 2,200 mètres carrés: on pensait qu'elle suffirait à fournir 20,000 mètres cubes par 24 heures. Mais ces prévisions furent trompées, et, lorsque le Rhône descendait à l'étiage, le débit des filtres tombait à 10,000 mètres cubes, on dut établir un second bassin filtrant présentant une surface de filtration de 2,168 mètres carrés. Grâce à ce bassin, on peut se dispenser de marcher, en temps d'étiage, avec une dénivellation supérieure à 2 mètres entre le niveau du Rhône et le niveau de l'eau dans le filtre : une dénivellation plus forte a l'inconvénient de changer le régime des machines et est dangereuse pour la solidité des parois d'enceinte, en même temps que le filtrage est moins parfait.

Le prix de la filtration d'un mètre cube d'eau dans les galeries filtrantes de Lyon revient à 0 fr. 007.

Les filtres projetés par M. Dumont pour une distribution d'eau de Seine dans la ville de Paris se composaient de voûtes en berceau, de 5 mètres d'ouverture, surbaissées au dixième, de $6^m,50$ de rayon, construites en briques creuses; les ouvertures des briques permettaient à l'eau de passer librement dans le réservoir formé par les voûtes. Ces voûtes, en briques creuses, devaient supporter un filtre artificiel composé comme il suit :

Sable fin.	$0^m,30$
Sable moyen.	$0^m,08$
Gros sable.	$0^m,10$
Petit gravier.	$0^m,10$
Pierres concassées passant dans un anneau de $0^m,06$	$0^m,12$
Total.	$0^m,70$

Galeries filtrantes des eaux de Nîmes. — Les eaux qui alimentent la ville de Nîmes ont été prises sur les bords du Rhône dans une galerie filtrante de 500 mètres de longueur ; c'est une voûte en arc de cercle de $5^m,75$ de rayon, de 11 mètres d'ouverture, de $0^m,60$ d'épaisseur à la clef et de $1^m,40$ d'épaisseur aux naissances. Les culées, de 3 mètres d'épaisseur, sont fondées sur le sable, au niveau de l'étiage, et présentent à 1 mètre au-dessus de l'étiage une retraite de $0^m,50$.

Le radier en sable a son point le plus bas à 2 mètres au-dessous de l'étiage.

Le profil en travers de ce radier se compose d'une demi-ellipse de 8 mètres de grand axe horizontal et de 3 mètres de demi petit axe; elle est bordée de deux berges en gravier de 1 mètre de large que prolonge la base des culées.

La surface filtrante de la galerie est de 5,500 mètres carrés.

« En l'état ordinaire des choses, dit M. l'ingénieur Dumont, il n'existe aucune communication directe entre le Rhône et l'intérieur de la galerie.

Les eaux n'arrivent donc dans cette galerie que par filtration à travers la masse de graviers dans lesquels elle est creusée.

Lorsque les machines fonctionnent, les faits suivants se produisent :

Les eaux s'abaissent d'abord dans les puisards étanches des machines ; il s'établit un courant des galeries de filtration et d'amenée à ces puisards. Le niveau des eaux baisse dans la galerie de filtration ; il se crée alors une pression du Rhône à l'intérieur de la galerie. Cette pression donne naissance à une filtration à travers les couches de gravier et les eaux claires affluent dans la galerie par tous les points du radier ; en un mot, il s'établit sur toute la surface de ce radier des sources artificielles.

Lorsque l'équilibre s'est établi entre l'aspiration des machines et le produit de ces sources artificielles de la galerie, le niveau de cette dernière reste constant.

Le produit de la filtration dépend d'ailleurs de trois coefficients :

1° La surface du radier filtrant;

2° La différence de niveau entre les eaux du Rhône et celles de la galerie, différence qui est produite par l'aspiration des machines ;

3° Enfin la hauteur des eaux du Rhône au-dessus de l'étiage.

Pour que ce travail de filtration présente d'ailleurs une permanence et un état satisfaisants, il doit remplir certaines conditions. Il faut :

1° Que la vitesse avec laquelle les eaux affluent dans la galerie par son radier ne soit pas assez forte pour provoquer des affouillements sous les culées, qui auraient pour effet d'entraîner les sables et les graviers ;

2° Qu'aucune filtration n'ait lieu dans le radier des puisards des machines ni dans celui de la galerie d'amenée, car une telle filtration pourrait à la longue compromettre la solidité des massifs qui supportent les machines et les pompes. »

L'expérience de Lyon a montré que le produit des galeries filtrantes devait être limité à 5 ou 6 mètres cubes par mètre carré et par heure.

« Aussitôt que le fleuve croît de quelques centimètres au-dessus de l'étiage, le produit de la filtration augmente dans une proportion énorme et, au bout de quelques instants, les machines deviennent impuissantes à provoquer le moindre abaissement dans le niveau de l'eau de la galerie.

A l'égard du nettoyage de ce filtre naturel, il faut d'ailleurs remarquer que les troubles, dont les eaux du Rhône sont chargées, se déposent sur la première couche de gravier, qui tapisse son lit, sur une épaisseur de $0^{m},20$ à $0^{m},30$ seulement, et, comme cette couche est sans cesse renouvelée et enlevée dans les crues du fleuve, il en résulte que ce dernier se charge de nettoyer ce filtre naturel et d'assurer ainsi sa permanence.

La galerie de filtration des eaux de Nîmes est revenue à 600 francs le mètre courant.

Comparaison des distributions d'eaux filtrées et des distributions de sources dérivées. — En traitant des qualités d'une eau potable, nous avons déjà comparé, au point de vue de la salubrité et de la limpidité, les eaux de rivières filtrées et les eaux de sources, et nous avons dit les raisons pour lesquelles on avait préféré alimenter Paris avec des eaux de sources dérivées à grands frais plutôt que de recourir à des eaux de Seine élevées par des machines après clarification.

M. Aristide Dumont, ingénieur en chef des ponts et chaussées, qui a établi des distributions d'eau filtrée à Lyon et à Nîmes, s'est montré le principal champion du système qui consistait en l'élévation des eaux de Seine filtrées.

Suivant lui, les dérivations des sources ne peuvent donner à la Ville de Paris que 200 litres d'eau par habitant et par jour, quantité qui deviendra rapidement insuffisante ; avec les machines, il est toujours facile de proportionner les produits aux besoins de la population ; les sources ont un débit essentiellement variable, qui diminue en été, c'est-à-dire précisément aux époques où la consommation augmente ; le prix d'un mètre cube d'eau de source dérivée est environ le double de celui d'un mètre cube d'eau de rivière filtrée et élevée par machines ; le prix d'un mètre cube d'eau de Seine, filtrée et élevée à 90 mètres de hauteur, ne serait que de $0^{fr},024$, soit par année, pour la fourniture journalière d'un mètre cube, une somme ronde de 9 francs.

Opinion de M. Belgrand sur la filtration. — M. Belgrand a fait triompher le système de la dérivation des eaux de source. Nous avons dit plus haut qu'il considérait les eaux de source comme seules potables à l'état naturel, et qu'il estimait que jusqu'à présent on n'avait pas trouvé de procédé pour ramener les eaux de rivière à un état irréprochable.

Nous trouvons dans les Études hydrologiques de l'éminent directeur des eaux de Paris les observations suivantes :

Il résulte d'expériences faites, pendant 423 jours consécutifs, que l'eau de Marne renferme en moyenne $56^{gr},13$ de matières solides par mètre cube ; cette eau a été claire pendant 161 jours, louche pendant 205 jours et trouble pendant 57 jours ;

Il résulte d'expériences faites, pendant 1039 jours, que l'eau de Seine ren

ferme en moyenne 24^{gr},05 de matières solides par mètre cube; cette eau a été claire pendant 646 jours, louche 286 jours et trouble pendant 107 jours.

En somme, les dépôts annuels dans les bassins de filtration n'atteindraient avec l'eau de Seine que 9^{kg},66 par mètre cube, distribué journellement, et avec l'eau de Marne 19^{kg},84; il n'en résulterait pas des dépôts très-encombrants, ni difficiles à enlever, et l'opération est parfaitement possible sous ce rapport.

M. Belgrand, d'après ses expériences, estime que presque toute l'eau fournie par les galeries filtrantes, voisines des rivières et ouvertes dans les alluvions, provient, non de la rivière elle-même, mais des nappes souterraines. En effet :

A Lyon, l'eau puisée dans le Rhône marquant à l'hydrotimètre..	16°
— celle de la galerie filtrante marquait.	18°
— et celle d'un puits du voisinage..	23°,77
A Toulouse, l'eau de la Garonne marquant.	13°,3
— celle de la galerie de filtration marquant.	16°
A Fontainebleau, l'eau de la Seine marquant..	16°,75
— celle de la galerie marquait.	21°,2
A Nevers, l'eau de la Loire marquant., ...	7°
— celle donnée par la machine marquait..	24°

A Blois, une galerie filtrante, établie dans le lit même du fleuve, donnait une eau marquant 14°, tandis que le degré du fleuve était de 7°.

M. Belgrand a fait ouvrir un puits dans les graviers de la plaine d'Issy, près Paris; l'eau, qu'il fournissait, après un long épuisement continu, était à la température de 12°, tandis que celle de la Seine était à 7°,5; le titre hydrométrique de l'eau du puits atteignait 45°, celui de l'eau de Seine n'étant que de 20°. L'eau du puits dont il s'agit était évidemment très-dure et impropre aux usages domestiques.

Du reste, ce fait est remarqué, depuis bien longtemps, en beaucoup de points de la vallée de Seine; nous connaissons des puits ouverts dans les graviers d'alluvions de la vallée, à 200 mètres du fleuve, qui ne donnent qu'une eau dure; on est forcé d'aller chercher à la Seine les eaux destinées à la cuisson des légumes.

C'est une erreur aussi d'admettre que le produit d'une galerie filtrante est proportionnel à sa surface; cette erreur est généralement commise. Sans doute, le débit augmente avec la dimension de la galerie, mais l'augmentation de l'un n'est pas aussi rapide que celle de l'autre; il en est de même, du reste, pour les puits, on n'en augmente pas sensiblement le débit en accroissant le diamètre, dès qu'il atteint une certaine valeur; nous reviendrons du reste sur ce point.

Ainsi, les eaux qui arrivent dans les galeries filtrantes, proviennent surtout des nappes souterraines et diffèrent, quelquefois, beaucoup de celles de la rivière; la qualité de celles-ci ne peut donc pas permettre de préjuger la qualité de celles-là.

« Ces résultats, dit M. Belgrand, permettent d'expliquer la persistance du filtrage dans ces galeries. On sait que les filtres artificiels s'engorgent avec une grande rapidité; à Paris, notamment, on est obligé, dans certaines saisons, de nettoyer tous les jours ceux des fontaines marchandes; même lorsque l'eau de Seine est claire, de fréquents nettoyages sont encore nécessaires. »

On se demandait comment les galeries filtrantes de Lyon et de Toulouse continuaient à fonctionner, depuis si longtemps, sans aucune espèce de nettoyage.

On cherchait à expliquer le fait en disant que le fleuve, en déplaçant les sables qui tapissent son lit, renouvelait la partie réellement utile du filtre; mais, s'il en était ainsi, lorsque le fleuve opère le nettoiement de ce filtre naturel en remuant les graviers qui en forment la superficie, les matières en suspension, entraînées par l'eau même qui se filtre, pénétreraient plus profondément dans la masse de ces graviers et en oblitéreraient rapidement et d'une manière irrémédiable tous les petits canaux. Le filtre deviendrait promptement imperméable. Cette explication n'est pas admissible.

« En admettant, au contraire, que les galeries filtrantes soient alimentées surtout par les nappes souterraines, on s'explique très-bien la persistance de leur action, puisqu'elles ne reçoivent que des eaux naturellement limpides.

« Ce moyen de se procurer de l'eau de source peut être mis en pratique, avec avantage, dans les plages de gravier des grandes vallées, des terrains crétacés du bassin de la Seine. Dans les autres terrains, l'eau de rivière doit être filtrée artificiellement. »

Ce qui corrobore l'opinion de M. Belgrand sur la provenance des eaux des galeries filtrantes, c'est ce fait que nous avons signalé aux galeries de Toulouse, que les eaux deviennent troubles quand la Garonne déborde ; les eaux du fleuve, s'épanchant à la surface, n'ont alors que quelques mètres à franchir pour pénétrer dans les galeries; elles les envahissent et se mélangent au produit des nappes souterraines.

Conclusion sur les filtres. — En ce qui touche les filtres artificiels, même ces grands filtres anglais de Chelsea si bien installés, « aucun de ces appareils, dit M. Belgrand, ne donne une solution satisfaisante. Tous laissent passer l'urine et d'autres produits azotés de la nature la plus répugnante. »

Le procédé anglais de Chelsea ne réussit, du reste, qu'avec des eaux louches plutôt que troubles; à Marseille, avec les eaux limoneuses de la Durance, le filtre anglais n'a donné que de médiocres résultats.

D'une manière générale, les filtres peuvent arriver à fournir une eau limpide, mais jamais ils ne donnent une eau agréable à boire; souvent même, l'eau filtrée a perdu de sa salubrité, parce qu'elle s'est dépouillée des gaz qu'elle contenait.

L'usage du filtre doit donc être évité autant que possible.

PETITS FILTRES EN USAGE DANS L'ÉCONOMIE DOMESTIQUE

Nous ne parlerons point de la clarification des eaux par le procédé chimique, nous réservant de traiter ce point lorsque nous aborderons la question de l'utilisation des eaux d'égout, et nous nous contenterons de décrire sommairement les principaux filtres en usage.

Filtre en grès. — Le plus connu est le filtre en grès. Dans une fontaine, généralement en terre cuite, on dispose une cloison horizontale formée d'une dalle mince d'un grès quartzeux, qui présente une grande porosité avec un grain homogène. Les raccords de la cloison et des parois de la fontaine sont soigneusement exécutés en ciment. On remplit la fontaine; l'eau, sous l'influence de la charge, traverse la paroi de grès et se rend dans un compartiment inférieur, d'où elle s'écoule à volonté par un robinet.

Ce filtre en grès ne conviendrait point pour des eaux très-sales; il demande, du reste, à être nettoyé et entretenu avec soin.

Les Anglais se servent d'une cloche en grès renversée dans une cuve cylindrique en tôle; l'eau des conduites arrive sous pression, remplit la cuve, traverse la cloche en grès, et s'accumule à l'intérieur de cette cloche, d'où on l'extrait par un robinet. Une pression de 3 mètres est nécessaire pour une bonne filtration.

Filtres ordinaires avec sable de rivière, charbon ou éponges. — Genieys a donné, dans son *Mémoire* sur la clarification et la dépuration des eaux, la description des trois filtres représentés par les figures suivantes :

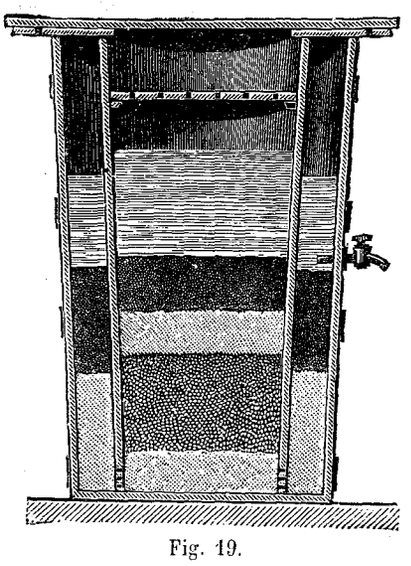

Fig. 19.

1° La figure 19 représente le filtre à double courant, proposé à la marine, par M. Zeni. C'est un tonneau à doubles parois latérales ; le tronc de cône intérieur a même fond que le tronc de cône extérieur, mais est percé à sa base de trous et d'échancrures, qui permettent à l'eau de passer du tonneau central dans l'espace annulaire qui l'entoure.

Au fond du tonneau central, nous trouvons d'abord une couche de sable fin de rivière; au-dessus est un mélange de sable fin et de poussière de charbon en parties égales, le tout bien battu ; vient ensuite une couche de sable fin de rivière, puis une couche de charbon en poudre que l'on remplace par du gros sable, si l'eau n'est pas infecte.

Au fond de la partie annulaire est une première assise de sable de rivière, surmontée d'une assise de charbon en poudre.

L'eau est versée au sommet du tonneau central sur une cloison horizontale percée de trous, qui arrête les plus grosses impuretés ; elle traverse de haut en bas les couches filtrantes, passe dans l'espace annulaire dont elle traverse les couches filtrantes de bas en haut, et s'écoule par un robinet.

L'eau obtenue par un mouvement ascensionnel a nécessairement abandonné tous les petits corps pesants qui auraient échappé à la filtration.

Elle parcourt un chemin double à travers les matières filtrantes et par conséquent s'épure davantage.

On peut nettoyer le filtre sans le défaire en établissant seulement un courant en sens inverse du premier, ce qui est facile à réaliser au moyen de deux robinets : pendant que le courant existe, on remue le sable du tonneau.

On ne devra introduire dans ce filtre du charbon de bois ou du charbon animal que si les eaux sont infectes ; s'il s'agit simplement d'eaux troubles, le sable suffit.

2° La figure 20 représente l'ancien filtre marin, qui se compose d'un seau de clapotage *a*, dans lequel on verse l'eau à filtrer ; il est muni d'un couvercle afin que l'eau ne s'échappe point par le roulis.

Le liquide passe par le fond du seau dans le premier réservoir *b* d'où il descend par le tube *d* dans le réservoir inférieur *c* ; sous l'influence de la pression il tend à remonter au niveau du réservoir *b*, il a donc la force nécessaire pour traverser les couches filtrantes *g* comprises entre deux cloisons horizontales per-

cées de trous. L'eau arrive donc dans le réservoir *k* d'où on l'extrait par le robinet *n* ; le robinet *m* sert à la vidange et au nettoyage de l'appareil.

L'air se comprimerait dans le compartiment *k* et empêcherait cette cavité de se remplir, si par un tube en plomb on ne la mettait en communication avec

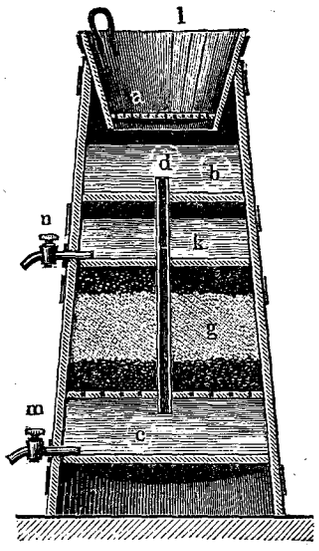

Fig. 20.

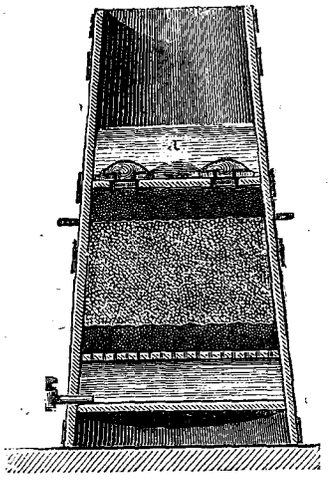

Fig. 21.

l'extérieur ; le tube en plomb doit s'élever au-dessus de l'appareil, afin que la colonne piézométrique ne puisse s'en échapper.

3° Les figures 21 et 22, données par Genieys, représentent un tonneau filtrant : c'est un tonneau en chêne, cerclé de fer et muni de poignées ; on verse l'eau à la partie supérieure, elle traverse les champignons à éponges *a* et pénètre dans le second compartiment où elle trouve soit des couches de sable pur, soit des couches alternées de sable et de charbon, elle traverse une paroi horizontale percée de trous et se rend dans la capacité inférieure, d'où on l'extrait par un robinet.

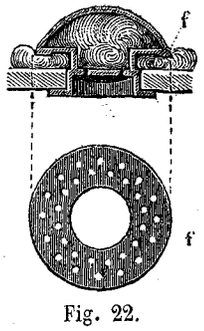

Fig. 22.

La figure 22 donne le détail d'un champignon à éponge ; la partie annulaire horizontale qui termine le champignon par-dessous est percée de trous qui livrent passage à l'eau ; avant comme après ces trous, l'eau doit en outre traverser une éponge.

Filtres Fonvielle. — Le filtre Fonvielle a été en grand usage pour l'épuration des eaux troubles. Il se compose de quatre couches filtrantes, séparées par des vides, et étagées dans une cuve de $3^m,50$ de haut. Chaque couche filtrante, formée de sable et de gravier, était intercalée entre deux feuilles de cuivre percées de trous. Le long de la cuve s'élevaient deux tubes verticaux mis en communication par des robinets avec tous les compartiments ; de sorte que, suivant le degré d'impureté de l'eau, on lui faisait traverser un nombre variable de couches filtrantes.

Les filtres s'oblitéraient rapidement, et il fallait enlever les couches sableuses pour les laver ; on en remplaça quelques-unes par des couches d'éponge, qui enlevaient d'abord les plus grosses impuretés de l'eau.

Le nettoyage des éponges est bien plus facile que celui du sable, mais il doit être fréquemment renouvelé, et le procédé ne laisse point que d'être assez coûteux.

En somme, le filtre Fonvielle ne s'est pas propagé autant qu'on l'aurait cru ; il réalisait cependant un grand perfectionnement ; les filtres ordinaires en pierre poreuse sont, en effet, insuffisants pour les besoins d'un établissement de quelque importance.

Avec les filtres Fonvielle, on obtient un débit considérable qui augmente avec la pression. Le filtre de l'Hôtel-Dieu, qui n'avait pas un mètre carré de section horizontale, donnait par jour, sous une charge de $\frac{7}{6}$ d'atmosphère, un débit de 50,000 litres au moins d'eau pure. C'est, comme on le voit, un résultat des plus utiles.

Filtres en laine. — Les filtres fabriqués avec la tontisse de laine, c'est-à-dire avec le produit de la tonte des draps, ont donné de meilleurs résultats.

A $0^m,10$ au-dessus du fond du réservoir on fixe un cadre horizontal portant une toile métallique à mailles serrées, sur laquelle on applique une feuille de feutre que l'on relève sur les bords ; on fait arriver de l'eau sur le feutre et on ajoute la laine tontisse dont les flocons se tassent et qu'on étale uniformément. On fait couler l'eau et l'on ajoute de la laine jusqu'à obtenir une couche de $0^m,05$.

Sur la couche de laine on pose un second châssis métallique semblable au premier, on comprime le tout et on bouche avec du feutre les interstices qui pourraient rester libres sur les bords du châssis.

Au-dessus de cette première couche de laine, on en dispose une seconde de la même manière, puis une troisième et une quatrième.

L'ensemble des couches est recouvert par un cadre que l'on serre au moyen de vis de pression.

La couche supérieure ne tarde pas à s'engorger par la vase et le débit de l'appareil diminue ; on commence par enlever la première assise de laine, puis on fonctionne quelque temps avec les trois autres ; ensuite on enlève la seconde et on fonctionne avec les deux qui restent.

Le débourbage de la laine s'effectue par un lavage méthodique dans plusieurs caisses pleines d'eau dont la pureté va en augmentant. Les flocons de laine doivent être agités énergiquement avec des espèces de patouillets.

Les filtres en tontisse de laine fonctionnent bien sous d'assez fortes pressions. Ils peuvent donner 60 à 180 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures.

L'emploi de la laine comme matière filtrante n'est du reste pas moderne ; D'après Strabon, on se servait en Asie de peaux de mouton pour filtrer l'eau.

Des filtres à l'Exposition de 1867. — Dans son rapport sur les distributions d'eau à l'Exposition universelle de 1867, M. l'ingénieur Huet présente les observations suivantes :

Les difficultés que présente le problème du filtrage des eaux de rivière sur une grande échelle n'ont pas été surmontées, et la question en est toujours au même point.

Les filtres naturels, auxquels la situation de certaines villes permet de recourir, donnent généralement de bons résultats. On augmente ceux de Toulouse en prolongeant les galeries ouvertes dans les graviers d'atterrissement de la Garonne. A Vienne, les galeries creusées auprès du fleuve, à $2^m,50$ seulement au-dessous de son niveau ordinaire, ne donnant pas un assez fort débit lors des basses eaux, on a établi à 200 mètres du fleuve et à 5 mètres en contrebas de son niveau moyen, une galerie en maçonnerie de 450 mètres de longueur ; elle

fournit une eau très-agréable à boire, mais qui ne paraît pas provenir du Danube; cette eau appartient sans doute à la nappe souterraine.

A Londres, on s'en tient toujours à l'ancien filtre en gravier, d'environ $1^m,50$ d'épaisseur, qui, sous une charge de $1^m,50$ à 2 mètres d'eau, fournit un débit de 6 à 8 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures; le développement des bassins filtrants de Londres atteint une superficie d'environ 19 hectares.

A Paris, où, à proprement parler, aucun système de filtrage en grand n'est appliqué, le filtre Vedel-Bernard, à haute pression, est celui qui sert d'une manière générale à la clarification des eaux vendues dans les fontaines marchandes de la ville.

C'est un cylindre en tôle, hermétiquement clos, dans lequel sont placées des couches successives de déchets d'éponge ou de laine préparée au tannate de fer, de grès, de charbon, de gravier; l'eau, qui arrive en pression à la partie supérieure, sort dans les mêmes conditions à la partie inférieure après avoir traversé ces couches de matières filtrantes et désinfectantes. Sous une charge de 15 mètres, 1 mètre carré de surface filtrante donne 190 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures. Ce filtre se nettoie par le lavage des éponges et de la laine.

Dans les habitations, nous avons toujours pour la fontaine de ménage le filtre en pierre; cependant, quelques appareils nouveaux qui tendent à s'y substituer méritent d'appeler l'attention.

Le principe essentiel du *filtre Bourgoise* est le feutre fortement comprimé, rendu imputrescible par une préparation de cachou et maintenu entre deux grilles métalliques galvanisées; ce filtre affecte diverses formes suivant l'usage auquel on le destine : filtre de poche, filtre à siphon, filtre de ménage; il a un débit beaucoup plus considérable que le filtre de pierre et se nettoie facilement par le renversement du courant; il se complète avec avantage par l'addition d'une couche de charbon superposée au filtre proprement dit, indépendante de ce filtre et facilement renouvelable.

Dans le *filtre Burcq*, on revient au filtre de pierre, écartant les matières filtrantes organiques, soit végétales, soit animales, qui ne peuvent jamais être employées sans inconvénient à la filtration d'une eau destinée à l'alimentation. On obtient d'ailleurs une filtration plus rapide qu'avec les filtres ordinaires, en raison de la nature de la pierre artificielle dont le filtre Burcq est formé; cette pierre, fabriquée avec la terre à poterie de grès, est rendue plus ou moins poreuse suivant la nature du liquide à filtrer, par un mélange de sciure de bois ou de toute autre matière analogue qui se brûle à la cuisson de la terre. Ce filtre se prête comme le filtre Bourgoise aux diverses formes de filtre de poche, filtre à siphon, filtre de ménage. Il se nettoie aussi par le renversement du courant et, au besoin, par l'action d'une brosse à la surface extérieure.

Moyen d'éviter le mélange des eaux courantes au confluent de deux cours d'eau. — Lorsque deux cours d'eau se rencontrent ou lorsqu'une source naît dans un cours d'eau, il arrive souvent que l'une des eaux est claire et l'autre trouble; il peut y avoir grand avantage à empêcher le mélange afin de recueillir l'eau claire.

A cet effet, M. Belgrand a indiqué un moyen simple, qui lui paraît susceptible de nombreuses applications.

« Il suffit, dit-il, d'entourer le débouché du petit cours d'eau d'une cloison grossière, non étanche. En laissant les eaux du ruisseau s'écouler librement par les vides de la cloison, l'eau de la rivière ne pourra entrer, même en temps de

crue, dans le petit bassin formé autour du confluent; car l'eau du ruisseau, en s'écoulant par les vides de la cloison, subit une perte de charge; son niveau est donc plus élevé à l'intérieur qu'à l'extérieur du bassin, et l'eau extérieure n'y peut rentrer. La cloison détruit d'ailleurs les tourbillonnements et le batillage de l'eau. Si l'on veut détourner complétement le petit ruisseau et empêcher tout mélange de son eau avec celle de la rivière à l'extérieur du bassin, la cloison non étanche est encore suffisante; car, par l'effet de la dérivation du petit ruisseau, une partie de l'eau de la rivière est appelée dans le bassin; elle subit une perte de charge en traversant la cloison; il en résulte une dénivellation de l'extérieur à l'intérieur du bassin, et pas une goutte d'eau du ruisseau ne peut sortir par les vides de la cloison. »

Par ce procédé simple, M. Belgrand a pu capter une source voisine de l'usine de Saint-Maur, source dont les eaux limpides disparaissaient à la moindre crue sous les eaux boueuses de la Marne.

CHAPITRE III

SOURCES ET PUITS

1° SOURCES NATURELLES ET SOURCES ARTIFICIELLES

Origine des sources[1]. — Lorsqu'une eau souterraine vient à paraître au jour et à couler sur le sol, elle constitue une source.

Les sources sont le produit de l'infiltration des eaux pluviales.

Les philosophes anciens donnaient aux sources une autre origine.

Les eaux des fontaines, des rivières et des fleuves se jettent dans la mer, disaient-ils, et son niveau ne varie pas! Quelle est donc la loi mystérieuse qui la règle? Car, à ne considérer que le volume des eaux versées depuis tant de siècles dans ce gouffre immense, la terre entière devrait être recouverte par un nouveau déluge.

Pour se rendre compte de cet invariable équilibre, ils ont imaginé que, par des conduits souterrains, la mer rendait aux fontaines, aux sources des fleuves le volume qu'elle en avait reçu; qu'il s'établissait ainsi une sorte de circulation perpétuelle entre les eaux de superficie et les eaux souterraines.

Nulle objection ne les arrêtait.

Les eaux de la mer sont salées et les eaux de fontaines sont douces.

Eh bien! les substances salines se déposaient dans le trajet des eaux.

Cette réponse ne portait-elle pas la conviction dans votre esprit, ils avaient à leur disposition un feu central qui réduisait en vapeur l'eau de ces canaux souterrains, et les produits de cette distillation immense, s'élevant des profondeurs de la terre, se condensaient à la surface et vous offraient les fontaines dégagées des éléments impurs qu'elles devaient à leur origine.

Que devenaient ces accumulations séculaires de substances salines? pourquoi n'obstruaient-elles pas les conduits? pourquoi ces immenses alambics ne se remplissaient-ils pas? pourquoi aussi cette variation périodique des fontaines dans les temps de pluie et de sécheresse, tandis qu'elles auraient dû présenter toujours un débit constant avec un réservoir tel que la mer.

Aux premières objections on répondait que la nature a des ressources infinies et que l'esprit des hommes est impuissant à les sonder. A la dernière, on avait fini par accorder que les eaux pluviales pouvaient bien exercer quelque influence dans la solution de la question qui divisait tous les esprits.

[1] Ces considérations sur l'origine des sources sont extraites en grande partie de l'ouvrage de Darcy « *les fontaines de Dijon* » ouvrage malheureusement épuisé.

Et d'ailleurs, les partisans des systèmes si dédaignés aujourd'hui n'avaient-ils pas pour eux les préjugés religieux, et, au besoin, le texte mal compris des livres sacrés?

Jadis Platon, et d'autres philosophes, indiquaient, pour le réservoir commun des sources et des fontaines, les gouffres du Tartare.

Des écrivains chrétiens ont prétendu plus tard, pour expliquer l'ascension des eaux du fond des entrailles de la terre, qu'elles n'y étaient point assujetties aux règles de l'hydrostatique.

Saint Thomas admet l'ascendant des astres ou la facilité attractive de la terre, qui rassemble les eaux dans son sein par une force que la Providence lui a départie suivant ses vues et ses desseins.

Puis arrivaient enfin, pour trancher la question, des passages mal interprétés de la Bible, que l'on jetait imprudemment au milieu de discussions tout humaines.

Et, pour mieux soutenir le faux système des conduits souterrains et des alambics monstrueux, on s'étayait de ces paroles de l'Ecclésiaste, verset 7 :

« Tous les fleuves entrent dans la mer, et la mer ne regorge pas ; les fleuves retournent au même lieu d'où ils étaient sortis pour couler encore. »

Voilà donc, s'écriait-on, la preuve irrécusable de la grande circulation souterraine des eaux, circulation nécessaire, indispensable, car sans elle, la terre disparaîtrait encore sous le niveau d'une mer sans rivages. *Plures quam mille fluvii in mare se exonerant, et majores ex illis tantâ copiâ, ut aqua illa, quam per totum annum emittant in mare, superet totam tellurem.* (*Varenius*).

Cette conséquence n'est pas rassurante, mais implique-t-elle nécessairement le mode de circulation adopté par les défenseurs des canaux souterrains?

N'est-il pas possible aux eaux versées dans la mer d'en sortir d'une autre façon et sous une autre forme?

La mer n'offre-t-elle pas une prodigieuse surface à l'évaporation journalière? Ne voit-on pas que cet immense volume de vapeur, qui chaque jour s'en élève, peut égaler et dépasser même, au bout de l'année, d'une part le volume des pluies qu'elle a reçues directement, et de l'autre, le débit des fleuves?

Ces vapeurs, en devenant des nuages que les courants atmosphériques déchirent et transportent, et dont une partie finit par se résoudre en pluie sur les terres, ne peuvent-elles pas à leur tour alimenter, par infiltration, les fontaines, les rivières et les fleuves?

On connaissait l'une des moitiés de cette chaîne sans fin qui devait nécessairement unir les fontaines à la mer et la mer aux fontaines. On dérobait l'autre à nos yeux en la plaçant dans les entrailles de la terre; on peut la voir au contraire; les nuages en sont les anneaux.

Ajoutons que les variations des sources, suivant les circonstances atmosphériques, et leur épuisement vers la fin de septembre, sont la conséquence immédiate du système que nous indiquons.

Et tout s'explique aisément alors ; la purification de l'eau des mers n'exigera plus pour s'opérer, comme dans le système de Descartes, que l'on imagine des feux souterrains, des alambics incommensurables ; le soleil ici sera le foyer et le bassin des mers le creuset de cette distillation immense.

Je ne donnerai point les calculs météorologiques qui ont fait passer cette théorie à l'état de vérité mathématique ; ils sont du ressort de la physique.

Une objection a été faite cependant, je crois devoir la rapporter, parce qu'elle

nous conduira sur la voie des divers moyens qui peuvent être employés pour arriver à découvrir des sources.

On a dit: les eaux pluviales ne pénètrent jamais qu'à quelques pieds dans les terres, comment pourraient-elles donc former les fontaines? *Pluvia non ultra decem pedum profunditatem humectat terram.* (*Varenius*). *Omnis humor intra priniam crustam consumitur, nec in inferiora descendit.* (*Sénèque.*)

Cette assertion serait-elle vraie en ce qui concerne les terres végétales, que la théorie précitée n'en serait pas ébranlée; car ce n'est point généralement à l'imbibition des terres à une profondeur plus ou moins grande qu'est due l'origine des sources.

On peut, en effet, partager les sources, quant à leur origine, en trois catégories principales:

1° Celles qui prennent naissance dans les terrains imperméables; elles doivent en général offrir un faible débit et tarir aisément, car elles ne sont, à vrai dire, que l'égout superficiel de ces terrains,

Quelquefois, pourtant, les terrains imperméables se laissent traverser par des sources très-abondantes d'eau thermale qui jaillissent à travers les failles qu'une convulsion géologique a produites.

2° Lorsqu'une couche imperméable recouverte d'une formation perméable vient affleurer, soit le flanc, soit le fond d'un vallon, on comprend qu'il doit presque toujours y avoir en ce lieu production d'une source plus ou moins abondante.

Si la couche imperméable passe sous le vallon à une profondeur notable, et qu'elle soit recouverte d'une couche perméable arrivant jusqu'au fond de ce vallon, il se forme là une sorte de vase remplie d'eau, dont le niveau monte ou baisse suivant la saison. Le dégorgement de ce vase, qui donne naissance à une ou plusieurs sources, doit en général s'opérer au point le plus bas, c'est-à-dire au fond du vallon; et toutefois de nouvelles sources, moins fortes, il est vrai, et moins constantes que les premières, peuvent surgir sur les flancs des coteaux, si des pluies abondantes relèvent assez le niveau des eaux souterraines pour amener ce résultat.

3° Il peut arriver enfin qu'une couche, perméable à son origine, soit enveloppée plus tard de formations imperméables qui lui servent de toit et de lit; alors les eaux coulent dans l'intervalle comme dans un conduit, et l'on obtient une source artésienne naturelle si une fracture heureuse du toit permet à l'eau de s'élever à la surface. Les puits artésiens tirent, comme on le sait, leur origine du percement artificiel de la couche supérieure.

On comprend, du reste, que les eaux qui coulent entre la double enveloppe peuvent descendre à de grandes profondeurs dans un vallon, puis remonter sur le versant opposé et jaillir en source sur un point tellement élevé qu'on ne se rend point compte, au premier abord, de la manière dont cette fontaine est alimentée. Ces couches aquifères, recouvertes de leurs enveloppes marneuses, peuvent descendre dans la mer et présenter quelques fractures de leur enveloppe supérieure sur le rivage ou sous les eaux.

De là l'existence des sources d'eau douce sur les bords et jusque dans les profondeurs de l'Océan. De là aussi la possibilité d'obtenir de l'eau douce en creusant des puits sur la plage.

Les indications qui précèdent suffiront, je pense, pour démontrer le grand avantage d'abaisser le niveau des sources qui apparaissent dans les couches perméables; car la diminution de pression qu'on opère ainsi sur le liquide a pour

double conséquence d'augmenter la vitesse du fluide qui sort du conduit naturel et de diminuer les pertes dues aux infiltrations.

C'est en vertu du même principe, mais inversement appliqué, que les ingénieurs, gênés par la rencontre d'une source dans des travaux hydrauliques, la cernent et l'emprisonnent de manière à la faire arriver à une hauteur telle que son débit soit anéanti.

C'est ainsi encore que, par suite de considérations du même ordre et pour se débarrasser des sources contre lesquelles on luttait difficilement, on a quelque fois travaillé dans les puits de mine sous l'influence artificielle de pressions plus grandes que l'atmosphère.

Si l'on vient maintenant à suivre par la pensée les canaux alimentaires des fontaines, que de ramifications les eaux qu'ils mènent n'auront-elles pas à parcourir! de cavernes grandes ou petites à remplir! de siphons à franchir!

Et si quelques-unes de ces ramifications, de ces cavernes sont incomplétement occupées par les fluides, voilà l'air qui, tantôt par sa dilatation, tantôt par sa compression, par suite de ses variations d'élasticité dues aux changements de température, modifiera nécessairement à son tour la marche souterraine des eaux.

De là, ces singularités que les fontaines offrent parfois à l'observateur et qui, indépendamment des circonstances atmosphériques, altérent d'une façon si curieuse l'uniformité du débit.

Dans les unes, l'écoulement cesse et recommence à des périodes régulières : elles sont appelées fontaines intermittentes.

Dans les autres, l'écoulement, sans s'arrêter entièrement, croît à partir d'un certain débit minimum jusqu'à un produit maximum, pour revenir ensuite au point de départ et recommencer la même période ; ce sont les fontaines intercalaires.

Viennent ensuite les fontaines intermittentes et les fontaines intercalaires composées. Les premières éprouvent dans leur marche une série de petites intermittences, séparées par un temps d'arrêt beaucoup plus considérable. Les secondes subissent dans leur volume une succession de variations également interrompues par une variation beaucoup plus grande, qui devient la limite de la période.

A peine j'ose entrer dans quelques explications au sujet de ces fontaines.

Pour qu'il y ait production d'une fontaine intermittente, il suffit que le courant tombe dans une cavité et que de cette cavité sorte un siphon naturel, intermédiaire nécessaire entre la cavité et le point d'émergence.

Il faut, de plus, que le siphon puisse débiter un volume plus grand que le volume naturellement amené dans l'excavation,

Alors, supposons que le siphon marche; il videra la cavité et la source débitera le volume qu'il donne ; la cavité vidée, l'air rentrera dans le siphon et la source s'arrêtera. Mais en même temps la grotte se remplira, et lorsque le niveau de l'eau sera arrivé à celui de la partie haute du siphon, cet appareil recommencera à jouer, et ainsi de suite.

Pour obtenir une fontaine intercalaire, il suffit d'imaginer que la ramification qui donne l'eau à la grotte se subdivise et qu'une des branches se vide directement au bassin de la fontaine.

On voit que le minimum du débit correspondra au moment où cette seconde branche donnera seule, et le maximum à l'instant où son produit s'ajoutera au volume maximum du siphon.

Pour se rendre compte de fontaines intermittentes composées, il suffit de supposer deux cavités communiquant par un siphon. La plus grande des cavités sera située en amont de la plus petite ; admettons encore que le siphon qui communique à la fontaine débite un plus grand volume que celui qui réunit les grottes, et qu'enfin chacun d'eux laisse couler un volume supérieur au produit naturel de la source. Alors, il est évident que la grande cavité enverra à la petite plus d'eau qu'elle n'en reçoit ; elle finira donc par se vider : la petite, à son tour, sera mise à sec plusieurs fois pendant que la grande cavité se désemplira, l'eau qu'elle renferme étant emportée par le siphon du plus fort calibre.

De là les petites intermittences, et la grande correspondra au temps nécessaire pour remplir de nouveau la grande grotte.

Que l'on ajoute maintenant à cet appareil naturel une ramification du cours principal se rendant directement au bassin de la source, et l'on aura ce qu'on appelle une fontaine intercalaire composée.

Maintenant, que pendant la saison des pluies de nouvelles sources se développent; qu'elles produisent au minimum ce que le siphon des fontaines intermittentes ou intercalaires peut débiter, alors le régime de la fontaine passe à l'uniformité.

Veut-on un exemple d'une fontaine qui coulerait pendant l'été et s'arrêterait lorsque le débit des sources augmente en général? Que l'on imagine dans la grotte de la fontaine intermittente simple, un orifice placé à une certaine hauteur au-dessus de l'extrémité de la courte branche du siphon.

Si cet orifice peut emmener tout ce que le conduit naturel fait arriver, cet orifice donnera naturellement lieu à une source d'un débit non interrompu.

Si l'eau augmente et que l'orifice précité ne puisse pas donner écoulement à tout le nouveau volume, la cavité se remplira, le siphon pourra s'amorcer, et s'il débite plus que le conduit qui amène les eaux à la grotte, celle-ci se videra, et par conséquent la fontaine à laquelle l'orifice précité donne naissance deviendra périodique, comme celle à laquelle le siphon envoie les eaux.

Enfin, si le volume du conduit principal augmente encore et s'il est égal à celui débité par le siphon, le plan des eaux étant dans la grotte au-dessous de l'orifice, il est manifeste que la fontaine qu'il desservait cessera de couler, tandis que celle du siphon deviendra uniforme.

Il existe en Angleterre plusieurs de ces fontaines qui coulent en été et s'arrêtent pendant l'hiver.

Voilà déjà des résultats bien variés, et je n'ai point fait entrer cependant en ligne les effets dus à la dilatation, à la compression, aux variations de température que l'air peut éprouver dans les conduits naturels.

Que l'on suppose, par exemple, un point haut dans ces conduits, et qu'une certaine quantité d'air se loge à partir de ce point haut dans la branche descendante. Pour un certain degré de température, la force élastique de l'air laissera l'eau franchir le point haut; mais que cette température augmente, l'eau ne pourra plus surmonter la nouvelle élasticité développée et l'écoulement s'arrêtera.

Enfin, lorsque les sources ne sont pas éloignées des bords de la mer, des irrégularités curieuses se présentent quelquefois dans leur débit.

Tantôt le débit croît et décroît avec la marée.

Tantôt il marche en sens inverse de la marée.

Dans le premier cas, le phénomène est facile à comprendre. La source peut être, en effet, considérée comme le niveau supérieur d'un tuyau irrégulier branché

sur le conduit souterrain qui l'alimente, lequel conduit est lui-même en communication avec la mer; lorsque cette dernière monte, le débit du grand conduit diminue et les frottements qui s'exercent contre les parois s'affaiblissent; en même temps, le niveau de la source doit tendre à s'élever et par conséquent son produit augmente.

L'effet contraire résulte de l'abaissement de la marée.

Je m'explique ainsi qu'il suit la marche inverse du débit de la source, relativement au flux et reflux ; j'admets que la mer communique par un conduit avec une cavité remplie d'air, sans que pourtant son niveau puisse atteindre cette dernière; j'admets encore que la source vienne déboucher dans cette cavité avant de surgir du sol ; je suppose enfin que le point où la source sort de terre soit réuni à la cavité précité, au moyen d'un conduit dont une partie affecte la forme d'un siphon renversé, *de manière à présenter une fermeture hydraulique*; l'air renfermé dans la cavité manquant d'issue ne peut s'échapper, même quand il est comprimé, et le seul résultat de cette compression est d'établir dans le conduit (côté de la cavité) une diminution de niveau nécessaire à l'établissement de l'équilibre.

Alors, si la marée monte, l'élasticité de l'air augmente et l'excès de compression subi par la source à son point d'émergence produit le même effet que si le niveau de cette dernière était exhaussé; son débit doit donc diminuer.

Quand la marée est basse, au contraire, le volume initial doit reparaître, parce que la pression redevient la même sur le point d'émergence de la source.

Dirai-je un dernier mot sur ces étangs qui, dans les grandes eaux, présentent un niveau moins élevé qu'à l'époque des sécheresses?

Ce qui se passe dans cette circonstance doit être analogue à ce que l'on remarque dans les vases tantales.

Il existe un siphon que le terrain dérobe aux regards et dont la courte branche est en communication avec les parties inférieures de l'étang. Dans les eaux basses, bien que leur niveau monte encore à une grande hauteur, cette dernière n'est point suffisante pour dépasser le point haut du siphon ; l'appareil ne peut fonctionner et toute l'eau reste dans l'étang. Mais que les grandes eaux arrivent, elles surmonteront dans un moment donné ce point haut, le siphon marchera et les eaux descendront dans l'étang jusqu'au moment où il y aura équilibre entre le produit de la source et le produit du siphon souterrain.

Je me borne à ces détails, peut-être déjà trop circonstanciés, car l'explication de ces cas particuliers est aujourd'hui familière à tous.

Mais si l'on se reporte à un temps où l'instruction était le patrimoine d'un petit nombre d'élus, où la physique, d'ailleurs, était dans l'enfance, on trouvera naturel que les phénomènes que je viens de rappeler fussent l'origine d'une foule de craintes et d'espérances, de pratiques et de préjugés superstitieux.

Quant à moi, lorsque je considère tous ces jeux de l'hydraulique dont nous avons aujourd'hui la clef, mais qui, pour les temps passés, étaient pleins de mystères, je ne m'étonne point que, dans l'impossibilité où se trouvaient les anciens d'assigner des lois physiques à ces écoulements si variés, ils aient, en désespoir de cause, placé toutes les fontaines sous la direction absolue de leurs capricieuses divinités.

« Nous adorons, dit Sénèque, les sources des grands fleuves, et nous plaçons des autels *à l'endroit où les eaux sortent brusquement des souterrains.* »

Influence de la perméabilité du sol sur la position et la puissance des sources. — Les considérations précédentes nous ont fait entrevoir la relation

qui existe entre les sources et les terrains dans lesquels elles prennent naissance.

Les caractères des sources qui sortent d'un terrain imperméable sont tout différents des caractères de celles qu'on rencontre dans un terrain perméable. Ces différences ont été saisies et exposées d'une manière claire et précise dans les études hydrologiques de M. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées.

1° **Sources des terrains imperméables.** — Lorsque, par un temps pluvieux, on parcourt un pays à sol imperméable, on voit l'eau ruisseler de toutes parts; s'il y a de la pente, cette eau coule à la surface et forme de nombreux ruisseaux qui ravinent les terres et qui, réunissant leurs eaux, engendrent des rivières limoneuses, d'allure torrentielle. S'écoulant à l'air libre, les eaux pluviales arrivent rapidement et simultanément dans les vallées, il en résulte des crues violentes qui se produisent en quelques heures, mais qui disparaissent de même lorsque la pluie vient à cesser; pendant la sécheresse, l'alimentation de ces cours d'eau cesse complétement et ils ne tardent pas à tarir.

Lorsque le sol imperméable est peu accidenté, les eaux pluviales ne trouvent pas d'écoulement; elles s'accumulent à la surface sous forme de marais et d'étangs.

L'alimentation des cours d'eau situés sur les terrains imperméables est donc essentiellement superficielle; les sources importantes sont rares dans ces terrains, et cela se conçoit, car une source est toujours alimentée par de l'eau pluviale qui s'est infiltrée dans le sol.

Cependant, l'imperméabilité d'un terrain n'est jamais absolue; il y a toujours des crevasses, des fissures qui recueillent une certaine quantité d'eau; les assises calcaires ou sableuses que l'on trouve associées à beaucoup de terrains imperméables, ont toujours une légère perméabilité, quelque compactes qu'elles soient, et lorsqu'elles affleurent sur le flanc du coteau, ou lorsqu'elles se relèvent pour se montrer au jour, elles donnent lieu à des pleurs ou suintements qui se réunissent pour former des sources.

La présence des sources dans les terrains imperméables tient donc à des causes accidentelles ; ces sources peuvent être nombreuses, mais il est bien rare qu'elles soient puissantes; en tous cas, elles sont irrégulièrement distribuées; on les trouve aussi bien dans le voisinage des sommets que sur le flanc d'un coteau ou dans une ondulation quelconque.

Elles ne forment point la base principale de l'alimentation des rivières ; celles-ci recueillent surtout les eaux superficielles, amenées dans les vallées par une multitude de ruisseaux, lesquels, généralement, ne prennent point naissance dans une source.

2° **Sources des terrains perméables.** — Considérons maintenant un terrain perméable, il absorbe toutes les eaux pluviales qu'il reçoit; celles-ci ne s'écoulent pas à la surface, elles pénètrent dans le sol jusqu'à ce qu'elles se trouvent arrêtées par une assise imperméable. Les ruisseaux sont rares à la surface du pays, puisqu'il n'y a pas d'écoulement superficiel : l'eau s'accumule à l'intérieur sous forme de nappe à niveau variable, qui monte ou qui s'abaisse, suivant que la saison est plus ou moins pluvieuse.

Qu'une ondulation, qu'une vallée se présente, dont le fond soit au-dessous du niveau de la nappe souterraine, celle-ci s'épanche et prend son cours à l'air libre. Elle forme une rivière dont les eaux sont limpides, car elles ont été filtrées pendant leur voyage souterrain; la vitesse du courant n'est jamais bien grande,

parce que les pluies passent lentement de la surface du sol au fond de la vallée et que leur vitesse de circulation dans la terre est nécessairement restreinte.

Avec ces cours d'eau, on ne connaît point les crues rapides et violentes; mais quand la nappe d'eau s'est élevée, elle met beaucoup de temps à descendre et il en résulte des crues modérées, mais durables.

Dans les terrains perméables, les eaux s'infiltrent par toute la surface du sol pour alimenter la nappe souterraine; celle-ci, drainée par les vallées, s'y épanche lorsque le fond de ces vallées est au-dessous du niveau de la nappe.

La communication entre la nappe souterraine et la rivière s'établit en divers points où l'eau trouve un débouché plus facile; ces points sont autant de sources.

Les sources dans les terrains perméables se rencontrent donc exclusivement au fond des vallées, c'est-à-dire sur le cours d'eau lui-même ou dans son voisinage; les plateaux et les versants conservent une aridité perpétuelle.

Si le terrain est également perméable, comme le sable, et présente à peu près partout la même facilité au passage des eaux, les eaux existent tout le long du lit et des berges de la rivière; elles sont nombreuses et faibles.

Généralement, il n'en est pas ainsi; il se présente toujours des portions de sol moins résistantes où le passage est plus facile, c'est là qu'on trouve les sources les plus abondantes, auxquelles correspond souvent l'origine d'un cours d'eau.

Ainsi la condition nécessaire et suffisante pour qu'il existe des sources et, par suite, un cours d'eau dans une vallée perméable, c'est que le niveau de la nappe d'eau souterraine soit plus élevé que le fond de la vallée.

Dans les parties hautes des vallées et dans beaucoup de vallées secondaires il n'en est pas ainsi; la nappe d'eau n'affleure pas le fond, on a ce qu'on appelle des vallées sèches.

La nappe d'eau, étant alimentée par les infiltrations des eaux pluviales, s'élève ou s'abaisse, suivant que la saison est plus ou moins humide; le débit des sources est lui-même soumis à ces variations. A la suite d'une sécheresse prolongée, des vallées que parcourait un courant d'eau peuvent se transformer en vallées sèches pour un temps plus ou moins long; les sources des parties hautes d'une vallée peuvent se tarir et la naissance de la rivière descend de plus en plus à mesure que la sécheresse se prolonge.

Les sources puissantes se rencontrent fréquemment aux points où les vallées secondaires viennent se souder à la vallée principale.

Lorsqu'on descend de la ligne de faîte qui sépare les bassins de la Loire et de la Seine par la vallée de l'Essonne jusqu'à la Seine, on se trouve d'abord sur le terrain qui porte le nom d'argile du Gâtinais; c'est un sol imperméable, sillonné de ruisseaux et autrefois parsemé d'étangs ou gâtines; en hiver, l'eau se montre de toutes parts, en été, tous les cours d'eau sont à sec; on rencontre bien çà et là des sources, elles sont disséminées au hasard, il en existe dans la forêt d'Orléans, au voisinage de la ligne de faîte; mais ces sources ont toutes un débit très-faible, elles ont pour origine quelques veines de sable plus ou moins pur placées sous l'argile et faisant office de drains naturels; après les argiles du Gâtinais, on entre sur un sol éminemment perméable, calcaire de Beauce et sables de Fontainebleau, tous les plateaux sont arides, bien des vallées secondaires sont sèches, les sources se rencontrent uniquement sur le thalweg de la vallée principale, et les plus importantes, qui portent le nom de noues ou de gouffres, apparaissent à la jonction de cette vallée et d'un vallon secondaire. Ces sources

donnent quelquefois passage au produit de l'infiltration des eaux pluviales tombées sur une vaste étendue; aussi sont-elles puissantes et souvent capables de faire tourner un moulin à quelques mètres de leur naissance.

3° **Niveaux d'eau.** — Dans un pays à sol imperméable, les sources, avons-nous dit, n'obéissent à aucune loi; elles sont dues à une cause accidentelle et on peut en rencontrer partout, dans le voisinage des sommets comme dans les ondulations des terrains.

Dans un sol perméable, les sources se rencontrent exclusivement dans le thalweg des vallées, c'est-à-dire au voisinage des cours d'eau; si le sol est d'une perméabilité homogène, comme le sable, les sources sont continues; si la perméabilité n'est pas homogène, comme dans les calcaires, les sources se trouvent aux points de plus facile passage et prennent quelquefois une importance capitale.

Lorsqu'un sol perméable est superposé à une couche imperméable, toute l'eau d'infiltration qui le pénètre est arrêtée par cette dernière; elle s'écoule dans le sens de la pente et paraît au jour sous forme de sources que l'on rencontre tout le long de la ligne de séparation des deux terrains perméable et imperméable.

Qu'une vallée d'érosion se présente dans un pareil terrain, on trouvera à flanc de coteau la ligne de séparation de l'assise perméable et de l'assise imperméable, et tout le long de cette ligne on trouvera des sources plus ou moins importantes, suivant que le passage est plus ou moins facile. La ligne séparative est ce qu'on appelle un niveau d'eau.

Ainsi, dans la vallée de la Marne, il existe un niveau d'eau qui correspond à la ligne séparative de l'argile plastique et du calcaire grossier.

4° **Puits artésiens.** — Les couches perméables et imperméables se superposent dans un même bassin comme le font des coupes de dimensions décroissantes que l'on empile les unes dans les autres; l'eau pluviale s'infiltre dans les couches perméables et descend dans la terre jusqu'à ce que la coupe soit pleine. Les couches imperméables restent sèches et l'eau se trouve emprisonnée entre deux de ces couches consécutives. Si l'on se place au centre du bassin et qu'on vienne à forer un tube à travers toutes les couches, l'eau emprisonnée s'élève et tend à prendre son niveau hydrostatique; ce niveau peut être dans certains cas plus élevé que la surface du sol, la diminution de pression se traduit par une production de vitesse; l'eau jaillit à la surface et l'on est en présence d'un jet d'eau naturel, de ce qu'on appelle un puits artésien.

Nous donnerons plus loin quelques détails sur les puits artésiens.

DE L'ART DE DÉCOUVRIR LES SOURCES

La géologie est le seul guide dans la recherche des sources. — Les notions précédentes nous montrent bien que la recherche des sources est intimement liée à la connaissance géologique du sol. Suivant l'imperméabilité ou la perméabilité des terrains, suivant le mode de superposition des assises perméables et imperméables, on saura dans quels points on a chance de rencontrer des sources. La géologie est le seul guide scientifique des chercheurs de sources.

Chercheurs de sources anciens et modernes[1]. — L'art de trouver les sources a été cultivé dans tous les temps; on le connaissait chez les Grecs; les Romains avaient pour les chercheurs d'eau ou aquiléges les plus grands égards.

Cassiodore, en répondant à un magistrat qui lui avait écrit au sujet d'un *aquilége* nouvellement arrivé d'Afrique, recommande d'user de son expérience et de le traiter avec une distinction marquée :

« *Habeatur ergo iste inter reliquarum artium magistros; ne quid desiderabile putetur fuisse, quod sub nobis non potuerit romana civitas continere.* »

Pline, Vitruve, Palladius étudient avec un soin diligent les moyens de découvrir les sources souterraines.

Je vais indiquer les principaux caractères auxquels ils prétendent qu'on doit les reconnaître. Et d'abord ils conseillent de faire les recherches dans les mois d'août, de septembre et d'octobre. A cette époque effectivement, les fontaines présentent le moindre débit, et si l'on en découvre alors, on doit concevoir la juste espérance qu'elles ne tariront dans aucun temps de l'année.

J'arrive maintenant aux signes qui trahissent le passage souterrain des eaux.

Un des signes les plus certains, dit Pline, ce sont les vapeurs qui s'élèvent sur les lieux au-dessous desquels coulent des veines liquides. Pour apercevoir ces vapeurs, il recommande de se coucher par terre *avant le soleil levé* et d'examiner attentivement, le menton appliqué contre la terre, si quelque colonne de vapeur ne vient pas à s'élever et a sondoyer au-dessus des lieux où il ne se trouve aucune humidité causée par les eaux sauvages.

Cassiodore ajoute une observation que je rappellerai en raison de sa singularité; d'après lui, les aquiléges mesurent la profondeur du courant souterrain par la hauteur à laquelle la vapeur semble s'élever : « *Addunt etiam in columnæ speciem conspici quemdam tenuissimum fumum, qui quanta fuerit altitudine porrectus ad summum, tanto in imum latices latere cognoscunt.* »

Mais cette opération est, à ce qu'il paraît, très-pénible, car Pline ajoute : « *Certior multo nebulosa exhalatio est ante ortum solis longius intuentibus.... sed tanta intentione oculorum opus est, ut indolescant.* »

Aussi a-t-on essayé de substituer à la vue simple d'autres moyens de reconnaître si ces vapeurs s'exhalaient; et, par exemple, on conseille de mettre *à la même heure*, sur les lieux où la source est espérée, une aiguille de bois en équilibre; cette aiguille est composée de deux parties, dont l'une doit être poreuse et très-hygrométrique, comme l'aulne, puis, s'il se dégage effectivement de la vapeur, l'extrémité poreuse s'inclinera vers la terre.

Vitruve engage encore à creuser un puits de 3 pieds de diamètre, sur 5 à 6 de profondeur et de placer au fond, lorsque le soleil se couche, un vase d'airain ou de plomb frotté d'huile; on renverse ce vase, on remplit la fosse avec des planches et des feuillages qu'on recouvre avec de la terre, et si le lendemain des gouttes d'eau sont attachées au vase, il affirme que la nappe liquide est au-dessous et qu'on la trouvera en creusant.

Belidor prétend, d'après Cassiodore, que si des tourbillons ou nuées de petits moucherons volent près de la terre, toujours à la même place, c'est qu'ils sont attirés par quelques exhalaisons de vapeur provenant d'une veine fluide.

Il recommande, à l'exemple de Vitruve, de noter les lieux où l'on rencontre des joncs, des roseaux, du baume sauvage, de l'argentine, du lierre terrestre, lorsque ces plantes ne peuvent être nourries que par les eaux sauvages.

[1] Ce paragraphe est extrait de l'ouvrage de Darcy.

Pline prescrit de faire des fouilles au point précis où l'on voit des masses de grenouilles semblant couver, tant elles pressent la terre pour s'approprier les vapeurs qui s'en exhalent.

Quand le sol est recouvert de gelée blanche, il est facile de s'assurer si un courant existe à peu de profondeur, car cette gelée ne tient pas sur sa direction, j'ai eu plusieurs fois l'occasion de faire cette remarque dans les temps de neige, en suivant la ligne de l'aqueduc de Dijon. La neige s'affaisse et fond en partie sur la ligne suivie par cette construction, bien que la voûte soit partout à plus de 1 mètre sous terre et que l'eau coule encore à 1 mètre au-dessous de l'extrados de cette voûte recouverte elle-même d'une chape.

Tels sont les principaux procédés que nous ont légués les anciens pour la découverte des sources. Mais avant de clore avec les traditions du passé, me sera-t-il permis de rappeler que Moïse, faisant jaillir une source dans le désert, devait avoir des imitateurs jaloux de renouveler la lutte que les devins de Pharaon ne craignirent pas d'engager avec le libérateur du peuple juif?

Aussi voyait-on déjà, dans le quinzième siècle, des hommes marchant à la découverte des sources, tenant deux des branches d'une fourche de coudrier, et attendant que la troisième, s'inclinant irrésistiblement vers la terre, indiquât la présence d'une nappe souterraine.

Le plus célèbre de la secte fut un nommé Jacques Aymard, qui fit grand bruit à Paris, en 1693 ; sur l'ordre de Colbert, l'abbé Gallois le présenta à l'Académie; mais la docte assemblée lui tendit un piége dans lequel se brisa la baguette enchantée du faux Moïse et le cours de ses miracles si variés fut brusquement interrompu. On sait que la baguette divinatoire, saluée sous les noms de Verge de Moïse, de Bâton de Jacob, de Verge d'Aaron, n'avait pas seulement la vertu de découvrir des sources ; elle tournait de plus sur les métaux, sur les trésors, sur les meurtriers qu'elle livrait à la justice, et sur les reliques des saints régulièrement canonisés ; sa vertu créa de tels prodiges qu'on recourut, pour l'expliquer, à l'intervention des puissances infernales. Mélanchthon lui-même, l'un des héros de la religion réformée, parlant des filons de mines qu'elle aidait à découvrir, ne put expliquer autrement cette propriété singulière que par des relations sympathiques qui uniraient ensemble les végétaux et les minéraux.

On est autorisé à croire que le culte de la baguette était déjà pratiqué dans l'antiquité. Elle est mentionnée dans les écrits de Neuheusius, de Varron, d'Agricole, de Cicéron: l'orateur romain, dans les conseils qu'il donne à son fils Marc, lui défend de se dérober aux affaires publiques, lors même qu'il découvrirait un trésor par la grâce de la baguette divine : « *Quid si omnia nobis quæ ad victum cultumque pertinent, quasi virgulâ divinâ, ut aiunt, suppeditarentur.* »

Mais il y avait aussi, à cette époque, des gens difficiles qui ne prêtaient pas foi aisément à ces prodiges.

Un chercheur de trésors avait proposé au poëte Ennius d'en découvrir un moyennant un drachme : « Je vous donne de bon cœur ce drachme, répondit-il, mais à prendre sur le trésor que vous trouverez :

> Quibus divitias pollicentur, ab iis drachmam ipsi petunt.
> De his divitiis deducam drachmam, reddam cætera.

Lorsqu'une source avait été trouvée par les procédés racontés avant la petite digression sur la baguette divinatoire, il fallait en tirer le meilleur parti possible : Vitruve donne le moyen suivant de la mettre à profit.

Si les signes que nous venons de décrire, dit-il, se rencontrent en quelque lieu, il faudra y creuser un puits, et si l'on aperçoit une source, en faire plusieurs autres à l'entour et les réunir par de petites galeries.

Ces précautions semblent indiquer que Vitruve ne comptait guère que sur des suintements dont il cherchait à augmenter le volume en les réunissant tous.

Cependant il semble résulter d'une lettre déjà citée et écrite par Cassiodore, que l'on arrivait parfois à des résultats bien plus importants, puisqu'il y recommande formellement au magistrat de faire accompagner l'aquilége d'Afrique par un homme habile dans la mécanique et sachant élever les eaux que l'on viendrait à découvrir.

Telle est à peu près la série des procédés auxquels on avait recours dans les temps anciens pour découvrir les sources, et qui constituaient la science de l'aquilége.

Avant d'arriver aux méthodes d'investigation d'un chercheur de sources dont le nom a été souvent répété dans les feuilles publiques, je vais donner quelques résultats d'expérience.

Une source, qu'on appelle à Dijon la fontaine des Suisses, avait presque entièrement disparu ; elle ne donnait plus qu'un cinquième de litre à la minute. Or, deux lignes de peupliers plantés le long de la petite vallée que la source parcourt offraient le phénomène suivant : les peupliers avaient été plantés à la même époque, et cependant le premier de chaque ligne présentait un développement plus que double des suivants.

« Je fis creuser, dit Darcy, une tranchée dans le lieu présumé d'où devait émerger la source, et je remarquai que les racines des deux premiers arbres s'étaient avancées de 8 à 10 mètres vers cette source, au milieu du bassin naturel de laquelle elles s'étaient établies pour s'en emparer en entier. Quelques travaux modifièrent le cours de la source, et son volume redevint égal à 12 ou 13 litres par minute.

« J'ai reconnu aussi, à la suite de terrassements exécutés au point de jonction des vallées secondaires avec la vallée principale, dans les terrains calcaires, l'existence de cours d'eaux se dirigeant vers la vallée principale dans des conduits à peu près circulaires, formés par les dépôts successifs de carbonate de chaux, qui agglutinaient les sables dont le sous-sol du vallon était composé. »

Méthode de l'abbé Paramelle. — L'un des chercheurs de sources les plus renommés dans le temps actuel, M. l'abbé Paramelle, n'est point un géologue connu, peut-être même n'est-il pas géologue ; mais, à coup sûr, il possède certaines connaissances empiriques qui le dirigent dans ses excursions hydrauliques. L'abbé Paramelle ne communique à personne ses moyens d'investigation ; il était cependant facile à un géologue exercé de les deviner s'il lui était donné d'accompagner cet hydroscope dans une de ses excursions. Aussi les quelques lignes suivantes témoigneront que ce secret a été surpris.

Le procédé d'exploration de M. Paramelle, bien que reposant, comme on le verra, sur une base rationnelle, présente néanmoins un large côté aléatoire ; ses succès ne peuvent donc point se compter par le nombre de ses promenades.

Dans les terrains massifs, c'est-à-dire non stratifiés, le relief du terrain présente des formes arrondies.

Lorsque la masse minérale, à raison de sa dureté et de sa cohésion, a pu résister aux érosions plus ou moins violentes des cataclysmes, l'inclinaison des côteaux est rapide comme dans les chaînes de montagnes granitiques.

Si les terrains massifs sont argileux, marneux et peu résistants, leurs formes

sont plus mollement accusées, et les pentes des versants moins rapides ; l'altération que subissent à la longue ces marnes, ces argiles, vient encore s'ajouter à leur facilité d'érosion pour déterminer, comme conséquence, l'adoucissement des versants sur lesquels elles reposent.

Enfin lorsque, dans les terrains stratifiés, une assise d'argile ou de marne est intercalée entre des masses rocheuses et résistantes, il est aisé de s'en apercevoir au premier aspect général d'une localité ; en effet, le profil du relief, d'abrupte et saccadé qu'il est toujours à l'affleurement des couches rocheuses, passe brusquement à une pente douce ou arrondie dans la partie correspondante à la couche altérable.

Les circonstances de relief des terrains que M. Paramelle connaît par son expérience, sinon par une appréciation scientifique, lui donnent immédiatement la clef de la nature du sous-sol qu'il doit considérer, premier moyen d'investigation. L'état et la nature de la végétation lui en offrent un second.

En effet, au fur et à mesure que M. l'abbé Paramelle remonte à pas lents un vallon ou une dépression continue pour y découvrir une source, on voit bien aux regards qu'il jette sur les plantes et sur le sol, qu'il cherche à induire de la nature et de la force végétatrices des premières, d'une part, et, d'autre part, de la consistance du second, la présence plus ou moins probable des eaux, et même leur profondeur approximative au-dessous de la superficie du terrain.

Nous pouvons maintenant nous faire une idée de la méthode de M. Paramelle. Et d'abord, suivons-le sur un plateau composé de masses rocheuses et stratifiées ; ces plateaux, généralement recouverts d'une faible épaisseur de terrain détritique perméable, sont eux-mêmes absorbants. Souvent même, lorsque ces plateaux forment des bassins fermés, on les voit perforés par des bas-fonds, puits ou entonnoirs, où se perdent les eaux pluviales ; ils sont d'ailleurs latéralement découpés par des gorges plus ou moins profondes, où, par une foule de fissures, se rendent plus ou moins promptement les eaux. Sur ces terrains, qui présentent un aspect desséché, la végétation est peu vigoureuse, les arbres rares et rachitiques ; aussi M. l'abbé Paramelle à peine entrevoit-il ces terrains qu'il s'empresse de dire : *Il n'y a rien à faire ici, n'allons pas plus loin.*

Cette conclusion négative, chacun l'avait déjà prononcée. Lorsque le relief du terrain annonçait au contraire, d'après les indications précédentes, un sous-sol de marne ou d'argile imperméable, il était rare que M. Paramelle n'annonçât pas l'existence d'une source, ou du moins la chance de la découvrir en tel ou tel point qu'il indiquait même d'assez loin, soit dans un vallon, soit dans un pli du sol.

Cette allégation reposait sur des bases aussi probables que la décision négative dans le cas précédent.

En effet, le sous-sol, dans la nouvelle hypothèse qui nous occupe, est presque toujours recouvert d'un terrain détritique, ne fût-ce que de terre végétale, au lieu d'un terrain de transport soit ancien, soit fluviatile, plus ou moins moderne ; les eaux pluviales y pénètrent et arrivent par suintements jusque sur le sol vierge, où elles circulent en suivant la pente qui tend à les réunir dans le thalweg des plis de ce sous-sol. Elles arrivent ainsi jusqu'aux parties inférieures du vallon où elles coulent sous la masse du sol, et quelquefois le détrempent jusqu'à le rendre marécageux.

Alors, M. l'abbé Paramelle dirigeait ses pas vers l'origine du vallon, s'arrêtait au point où il supposait son profil le plus resserré et où, en même temps, l'épaisseur du sol détritique ou diluvien lui semblait la moins grande, puis il prescrivait en ce lieu l'exécution d'une tranchée perpendiculaire à la direction du

thalweg du vallon, et la construction d'un mur imperméable descendant à une profondeur qu'il déterminait à peu près. Enfin, pour couronner l'œuvre, il annonçait qu'en plaçant un tube à travers ce mur, il en sortirait une source grosse comme le petit doigt, le pouce ou l'avant-bras, suivant l'étendue du bassin sur lequel il opérait.

C'est par une longue habitude que M. Paramelle est parvenu à apprécier rapidement non-seulement les formes du sous-sol imperméable, et, jusqu'à un certain point, l'épaisseur des terrains modernes, alluviens ou détritiques, qui le recouvrent, mais encore par l'étendue des vallons, bassins ou dépressions, la quantité d'eau qu'on pouvait faire surgir sur un point choisi.

Pour un vallon secondaire creusé dans l'affleurement de puissantes assises d'argile ou de marne, au-dessous des escarpements abruptes qui dominent une vallée principale, les circonstances sont les mêmes, ainsi que la méthode d'investigation; seulement, dans ce cas, l'épaisseur des terrains d'éboulis ou d'anciens dépôts de moraines peut mettre le chercheur de sources en défaut; quelquefois, au contraire, lorsque au-dessous des vallées explorées un pli des terrains supérieurs déverse des sources masquées sous les dépôts, le succès des recherches dépasse toute espérance.

On voit donc que guidé, comme il l'est en effet, par les considérations précédentes, M. l'abbé Paramelle peut souvent réussir dans ses recherches.

D'autres fois des dislocations inaperçues ou de grands éboulements déplaçant les masses argileuses jettent l'abbé Paramelle dans l'erreur. Il doit arriver encore qu'en opérant sur un vallon, dont le sous-sol n'est imperméable que sur une zone bornée par l'affleurement d'une assise marneuse d'une épaisseur médiocre, les indications portent en dehors de sa limite cachée par des dépôts superficiels. Les intéressés, du reste, ont souvent à s'imputer de leur côté la cause des non succès; au lieu d'approfondir assez leurs tranchées et d'enraciner convenablement le mur dans le sous-sol imperméable, ils s'arrêtent avant le moment convenable, et en ne descendant pas assez les fondations du mur par une économie mal entendue, ils laissent échapper les eaux par-dessous sans les intercepter et les recueillir.

Les recherches de M. l'abbé Paramelle sont donc exposées à bien des causes d'erreur qui peuvent tromper les prévisions; toutefois, on comprend que les déceptions sont beaucoup moins fréquentes dans des localités à sous-sol franchement massif, argileux, marneux, imperméable.

Il est inutile d'ajouter, qu'une fois la source mise à jour, soit qu'on en réunisse les suintements dans un puisard, soit qu'on la recueille au moyen d'un orifice pratiqué dans le petit barrage, enraciné dans le sous-sol imperméable, il est facile de la distribuer, selon les besoins, partout où son niveau permet de la conduire.

Tel est, en résumé, la méthode de M. l'abbé Paramelle. On concluera aisément, de ce qu'on vient de lire, que ce procédé ne peut être appliqué à la recherche des sources, circulant dans une couche perméable, ayant des couches imperméables pour base et pour toit, ces sources dites artésiennes ne s'obtiennent en effet que par la fracture naturelle ou le percement artificiel de l'enveloppe supérieure; mais, encore une fois, le mode d'investigation de M. Paramelle reprend sa valeur et son utilité pratique pour la recherche des nappes, formées par le suintement des eaux pluviales à travers des terrains détritiques, placés sur un terrain composé d'argiles compactes, ou de marnes ou, enfin, de terrains massifs quelconques imperméables.

Il n'y a là, comme on le voit, ni procédés mystérieux, ni magie; un peu de mise en scène peut-être! Toutefois, il faut reconnaître que, malgré les incertitudes qu'ils présentent, les moyens d'exploration de l'abbé Paramel ont été pour les habitants des campagnes l'occasion de découvertes précieuses, en permettant parfois de faire surgir du sol des eaux qui, suintant et circulant à une certaine profondeur, allaient auparavant se perdre dans le sous-sol des bas-fonds et dans le thalweg des vallons. En effet, ces eaux, ainsi ramenées à la surface, présentent une utilité réelle au lieu de contribuer le plus souvent à rendre marécageux et improductifs des terrains, naturellement riches de puissance végétative par leur composition minérale, par leur position, et destinés à prendre une grande valeur par l'assainissement.

DES SOURCES ARTIFICIELLES

Lorsqu'on est parvenu à savoir qu'un terrain renferme des couches aquifères, on peut en réunir les eaux par les procédés suivants :

1° Si elles coulent souterrainement dans une vallée étroite, on en arrête le cours à l'aide d'un corroi ou d'un bétonnage, descendant jusqu'aux couches relativement imperméables;

2° On peut aussi soutirer l'eau au moyen de pierrées, comprenant une voûte et des culées imperméables avec une cuvette et un radier perméables.

Ces pierrées fonctionnent comme des drains; on peut même recourir à de simples tuyaux de drainage, pour recueillir et amener dans un réservoir toutes les eaux que renferme un sol perméable.

Procédé de Bélidor. — Bélidor avait indiqué comme il suit le moyen de créer des sources artificielles :

« Quand on veut, dit-il, avoir beaucoup d'eau, on creuse une tranchée à une profondeur convenable, avec pente suffisante; on étend sur le fond un lit de terre glaise bien battue, ensuite l'on construit deux murs pour former un petit canal que l'on recouvre avec des pierres plates, et ensuite des gazons renversés pour empêcher qu'en recomblant la fouille il ne tombe rien sur le fond. »

Eaux de Gray. — Près de Gray, il y a des élévations, mais sans aucune source; et, pour obtenir des fontaines, M. Normand, ingénieur, fit faire un long fossé qui contournait la hauteur supérieure à Gray, avec pente convenable. Sur le côté de ce fossé qui regardait le bas du monticule, il fit faire un bon mur avec corroi derrière; de l'autre côté, il ne fit faire qu'un mur à sec, afin que les eaux puissent passer à travers. Entre les deux murs, il établit une rigole en pierres de taille. Enfin, il plaça des dalles sur toute cette construction, qui, en réunissant toutes les eaux supérieures, les mène à un bassin d'où part le tuyau de conduite.

On recueillit ainsi une quantité d'eau, malheureusement très-faible, car il lui arrive de n'atteindre au mois de mai que 19 litres par minute.

Cependant, en calculant la quantité d'eau tombée sur la superficie des versants, on pouvait compter sur un débit beaucoup plus considérable.

Il ne faut donc pas ajouter foi aux calculs basés sur la quantité d'eau, qui tombe annuellement sur une surface donnée; en effet, une partie de cette eau s'écoule à la surface, une autre s'évapore, une autre pénètre dans le sol; la ré-

partition varie avec les saisons et avec la nature du sol. En été, presque toute l'eau qui tombe retourne dans l'atmosphère et ne profite ni aux cours d'eau ni à la nappe souterraine. Dans les saisons froides, l'évaporation est faible ; dans les terrains imperméables, la plus grosse part de l'eau pluviale coule à la surface et alimente directement les rivières ; dans les terrains perméables, au contraire, l'écoulement superficiel a peu d'importance, et presque tout le volume pénètre à l'intérieur du sol pour alimenter les nappes souterraines.

Dans les terrains perméables, assis sur une couche imperméable, il sera donc possible de recueillir à peu près toute la quantité d'eau pluviale, qui tombe en hiver.

La création des fontaines artificielles est très-facile dans les terrains perméables[1]. — « L'eau potable ne doit pas seulement être conduite et distribuée par des canaux artificiels, elle doit aussi être recueillie par un réseau de tuyaux artificiels, pour que, dans tout son parcours, à partir de la terre où elle tombe jusqu'au robinet où elle se consomme, elle soit à l'abri des altérations accidentelles. »

Ces tuyaux collecteurs sont pour *l'extrémité rurale* de l'aqueduc, ce que sont pour son extrémité urbaine les tuyaux distributeurs ; et de même que l'aqueduc est une rivière artificielle, de même ces tuyaux nourriciers sont des sources artificielles; posés dans des sables siliceux, à 4 ou 5 pieds de profondeur, ils recueillent l'eau de pluie au point de sa plus grande pureté, au point où elle s'est débarrassée par la filtration de toute imprégnation atmosphérique, sans avoir eu le temps d'absorber des impuretés terrestres.

A Farnham, à Rugby, à Sandgate, à Ottery-Saint-Mary, ce système a été pratiqué; la disposition des tuyaux de drainage, destinés à recueillir l'eau, varie selon la configuration du sol. En général, il convient de faire monter les tuyaux principaux dans le sens de la pente du terrain, en dirigeant les embranchements à droite et à gauche; quelquefois on entoure une colline d'un tuyau collecteur, en suivant les contours de sa base et en dirigeant un embranchement vers son sommet, le long de chaque pli creux; quelquefois, comme sur la bruyère de Farnham, un simple drainage en patte d'oie, posé sur un plateau très-légèrement incliné, fournit une masse d'eau qui dépasse toutes prévisions.

On ne saurait rien préciser à l'avance sur le coût du réseau collecteur, il variera évidemment avec la configuration du sol et avec sa nature.

M. Ward fait observer que lorsqu'on peut se ménager, à l'amont des drains, un plateau sablonneux, convenablement incliné, la pluie qui y tombe et s'y infiltre est dirigée vers le tuyau, de sorte que le drainage d'un seul hectare sert à recueillir l'eau, due à une surface beaucoup plus grande. C'est ainsi qu'à Farnham le drainage d'un hectare de bruyère, suffit à l'alimentation de 1,500 personnes.

L'influence de cette circonstance est pareillement manifestée d'une manière frappante à Rugby et à Sandgate, deux villes, comme on l'a vu, alimentées par des sources artificielles, semblables à celles de Farnham. La population de Rugby est de 10,000 âmes, et pour la desservir, on projeta un réseau collecteur de 1,000 acres (404,67 hectares). M. Rammel commença par poser un tuyau principal pour recevoir les embranchements secondaires; mais à son grand étonnement, ce premier tuyau suffit seul à l'alimentation de toute la

[1] Paragraphe extrait de l'ouvrage de Darcy.

ville ; ce tuyau, qui est à joints ouverts, comme les tuyaux de drainage ordinaires, a 9 pouces (22c,86) de diamètre et 185 yards (1691m,60) de développement. A Sandgate, le premier tuyau du réseau suffit, sans embranchement aucun, à la consommation de la ville.

La disposition, le degré d'inclinaison des terrains collecteurs influent, d'ailleurs, sur un autre élément de la dépense de l'opération entière, c'est-à-dire sur la capacité des réservoirs à établir pour l'approvisionnement de l'eau versée par les drains.

A Farnham, l'emmagasinage naturel de l'eau dans les sables est si complet, le régime de celle conduite par les drains est tellement régulier, que tout le service de la ville a pu se faire sans inconvénient, au moyen d'une simple citerne, de 250 mètres cubes de capacité. L'entretien du terrain collecteur, avec son réseau tubulaire, n'exige, en général, que de très-faibles sacrifices. M. Ward dit qu'à Farnham, le soin des tuyaux collecteurs est confié à un homme, à un vieux draineur qui lui a assuré que cette besogne ne lui prenait en moyenne qu'une journée de travail par mois ; ce travail consiste principalement dans l'enlèvement du sable, qui entre dans les tuyaux et qui tombe dans de petites fosses ménagées de distance en distance pour le recevoir.

M. Ward décrit aussi la nature des terrains qu'il a rencontrés dans les environs de Bruxelles, et qui lui semblent favorables aux opérations précitées.

1° Sable perméable d'une profondeur d'un demi-mètre à 1 mètre, dont le quart supérieur est noirci par un mélange de terre végétale résultant, sans doute, de la décomposition de la bruyère.

2° Au-dessous de cette bande noire se présente, en général, au moins un demi-mètre de sable pur, précisément l'épaisseur désirable pour la filtration de l'eau.

3° Sous ce filtre naturel, bande de sable durci, espèce de croûte ou d'agrégat, évidemment imperméable à l'eau ; un sous-sol, exactement pareil, existe sur une grande partie des bruyères anglaises, et c'est sur sa surface, au fond de la couche sablonneuse, qu'il convient de placer les tuyaux collecteurs.

Sir Charles Lyell, dans sa *Monographie* sur la géologie comparée de l'Angleterre et de la Belgique, s'exprime ainsi :

« *Somme toute*, ces sables (les terrains ci-dessus décrits) m'ont rappelé, par leur aspect et par leur caractère minéral, une grande partie de la division ferrugineuse du *lower green sand*, dans le sud-est de l'Angleterre. » C'est précisément, ajoute M. Ward, le *lower green sand* qui fournit l'eau pure et délicieuse, dont jouissent *les habitants de Farnham;* on comprend, au reste, qu'une pareille eau, qui ne traverse que des sables siliceux, insolubles, et circule sur des terrains de même nature, doit jouir d'une grande pureté. L'aphorisme de Pline : « *Tales sunt aquæ, quales sunt terræ per quas fluunt*, » est vrai de nos jours comme de son temps ; d'autres natures de terrains collecteurs influeraient donc sur la qualité des eaux versées dans les drains.

Je terminerai cet exposé par quelques mots sur la superficie, que le terrain collecteur doit offrir.

S'il s'agissait, par exemple, d'obtenir un volume d'eau annuel égal à V, on remarquerait que la terrain collecteur doit offrir uue surface telle, qu'en la multipliant par la hauteur de pluie qui tombe annuellement, on obtienne le volume précité ; mais évidemment on ne doit pas prendre la hauteur entière de la pluie qui tombe ; l'évaporation et toutes les autres causes de perte doivent faire réduire d'un quart cette hauteur, suivant les ingénieurs anglais ; je trouve même

le coefficient 0,75 un peu faible, et je crois qu'il vaudrait mieux calculer sur moitié de perte[1].

Appelant H la hauteur de pluie qui tombe, S la surface cherchée, on aura :

$$S \times 0{,}50\,H = V,$$

d'où

$$S = \frac{V}{0{,}50\,H} = 2.\,\frac{V}{H}.$$

Je viens de dire que l'on ne devrait compter que sur la moitié de la hauteur de la pluie qui tombe, pour la création des fontaines artificielles, M. Babinet, de l'Institut, a adopté la même proportion.

Dans un excellent article ayant pour titre : *l'arrosement du globe*, et publié par ce savant dans la *Revue des Deux-Mondes*, il raconte et précise en ces termes l'idée connue de Bernard de Palissy, sur la création des fontaines artificielles.

« Dans la France, et notamment dans les environs de Paris, 2 hectares reçoivent à peu près par an 10,000 mètres cubes d'eau, dont la moitié peut être utilisée pour la fontaine artificielle, c'est-à-dire environ 5,000 mètres cubes. Or, ce que les fontainiers appellent *pouce d'eau* est une fontaine qui fournirait aisément aux besoins de deux forts villages, hommes et bestiaux. Une fontaine donnant *un demi-pouce* d'eau fournit par an 3,650 mètres cubes (à raison de 20 mètres cubes par jour pour le pouce d'eau) ; c'est beaucoup moins que les 5,000 mètres cubes de pluie que l'on peut utiliser avec 2 hectares, en admettant une perte de moitié. Il faudrait donc bien moins de 2 hectares préparés comme nous allons le dire, d'après M. Séguin, pour obtenir infailliblement une belle et utile fontaine. Voici, en un mot, mon extrême conclusion.

« Choisissez un terrain de 2 hectares ou de 1 hectare et demi, dont le sol soit sablonneux, comme le bois de Boulogne et les autres bois qui entourent Paris, et qui offre, de plus, une légère pente vers un côté quelconque pour fournir ensuite un écoulement aux eaux. Faites, dans toute sa longueur et au plus haut, une tranchée de 1 mètre 1/2 à 2 mètres de profondeur sur environ 2 mètres de large. Aplanissez le fond de cette tranchée et rendez-le imperméable par un pavé, un macadamisage, un fond de bitume, ou, ce qui est plus simple et moins coûteux, par une couche de terre glaise, substance commune dans les environs de Paris. A côté de cette tranchée, faites-en une autre pareille, dont vous rejeterez la terre pour combler la première, et ainsi de suite, jusqu'à ce que vous ayez, pour ainsi dire, rendu tout le sous-sol de votre terrain imperméable à l'eau de pluie. Plantez-le tout d'arbres fruitiers, et surtout d'arbres à basse tige qui ombragent le terrain sablonneux et arrêtent les courants d'air qui tendraient à réabsorber la pluie ; enfin pratiquez, dans la partie la plus basse du terrain, une espèce de mur ou contre-fort en pierre avec une issue au milieu. Vous aurez infailliblement une belle et bonne source, qui coulera sans intermittence et suffira aux besoins d'un village entier ou d'un vaste château. Je n'ai pas sous les yeux le prix de revient calculé d'après le prix de la main-d'œuvre et des transports pour Paris et les départements, mais je me souviens très-bien que cette dépense était accessible à toutes les fortunes des particuliers dans l'aisance et à toutes les communes privées d'eau. La spéculation pouvant même s'en emparer pour faire

[1] Ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, il faut faire les réserves sur la proposition adoptée par Darcy. Le cœfficient dépend essentiellement du degré de perméabilité du sol. Nous aurons lieu de revenir sur ce sujet.

le bien public avec l'utilité privée. Dans la forêt de Fontainebleau, si pauvre de fontaines pour les hommes et pour le gibier, où le sol est si sablonneux et la terre glaise si à proximité, comment n'a-t-on point encore pratiqué de fontaines artificielles?

Dans un voyage que j'y fis vers 1845, je croyais avoir fait adopter cette idée à plusieurs des notables habitants ou des autorités de cette délicieuse résidence. Il est mille localités des environs de Paris que je pourrais également indiquer. Le sol, bien loin d'être rendu infertile par ces opérations, en devient plus meuble, plus facile à amender, et les arbres qu'il porte pour le protéger contre l'évaporation sont d'un bon produit, et plantés dans les conditions les plus avantageuses. Tout particulier, toute commune, toute administration qui aura établi, n'importe à quels frais et sur quelle échelle, une fontaine artificielle, et qui pourra dire alors : Faites comme moi, et même mieux que moi, en évitant les inconvénients que j'ai rencontrés et que je vous signale, aura bien mérité de la société entière, et pourra se dire : J'ai fait quelque chose d'utile.

Observations sur la création des sources artificielles. — MM. Ward et Chadwyck ont préconisé en Angleterre le système des sources artificielles pour l'alimentation des villes.

Ce système consiste à drainer, comme on le fait en agriculture, des sols convenablement choisis, capables de fournir une eau pure et potable ; ce sont les sols sableux et siliceux qui conviennent le mieux ; les sols calcaires donnent une eau médiocre, quelquefois mauvaise.

On compte d'ordinaire sur la moitié de l'eau pluviale tombée sur le pays ; en Angleterre, il tombe $1^m,20$ de hauteur de pluie ; on en recueille donc $0^m,60$, soit 6,000 mètres cubes par hectare et par an.

Pour une population de 1,000 âmes, à laquelle on veut donner 150 litres d'eau par tête et par jour, il faut par an 54,000 mètres cubes; c'est-à-dire que le drainage de 9 hectares suffira à alimenter une agglomération de 1,000 habitants.

En admettant qu'à Paris il tombe 1 mètre de pluie (ce nombre est supérieur à la moyenne), il faudra 10 hectares par 1,000 habitants, soit 20,000 hectares ou un carré de 14 kilomètres de côté pour la ville entière.

Il est évident que, dans l'application, le drainage de grandes superficies pour l'alimentation des villes soulèverait de grosses difficultés et ne serait guère applicable.

Le procédé semble donc être réservé pour les petites agglomérations. Mais quelquefois, il ne se présente plus comme un simple drainage agricole ; il peut exister une sorte de drainage naturel, une couche perméable de grande étendue reposant sur une assise imperméable ou comprise entre deux assises imperméables ; dans ce cas, si l'on établit une galerie de captation dans la couche perméable, on peut recueillir de grandes quantités d'eau, capables de suffire à l'alimentation d'une ville importante.

Lorsqu'on projette une alimentation par drainage, le premier point à connaître est la hauteur de pluie annuelle qui tombe dans le pays.

Il y a aujourd'hui des pluviomètres installés à peu près partout et il est facile d'obtenir un nombre suffisamment approché.

La quantité de pluie qui tombe dans le bassin de la Seine augmente avec l'altitude et avec le voisinage de la mer. Ainsi, que l'on se dirige du massif du Morvan vers la Manche, on trouve les résultats suivants :

Le réservoir des Settons à l'altitude de	600	mètres, reçoit	1750	millimètres de pluie.
La ville de Saulieu.	539	—	1044	—
Clamecy.	147	—	719	—
Auxerre.	122	—	682	—
Sens..	81	—	626	—
Paris..	39	—	556	—
Rouen..	43	—	793	—
Le Havre.	89	—	924	—

On voit que, dans la zone centrale du bassin de la Seine, zone qui comprend Paris, il ne faut pas compter sur une hauteur annuelle supérieure à 600 millimètres.

Distribution d'eau de Liége. — La distribution d'eau de Liége est alimentée par les eaux souterraines du sol crétacé qui forme une ligne de coteaux dominant la ville.

« On va chercher les eaux, dit M. de Freycinet, au moyen de galeries traversant le terrain houiller et les argiles de la base du terrain crétacé et ensuite pénétrant dans les couches perméables supérieures reconnues très aquifères. La galerie principale, dite galerie d'Ans, débouchera près des faubourgs, à 65 mètres au-dessus du niveau de la Meuse. Elle aura $1^m,80$ sur $1^m,20$ de section, cinq kilomètres de longueur et une pente dirigée vers la ville, de 1 millimètre par mètre. Soigneusement maçonnée dans tout son parcours à travers les argiles et les terrains houillers, afin de ne pas recevoir les infiltrations moins pures de ces couches, elle sera, au contraire, à vif dans le terrain crétacé. A l'extrémité de cette galerie, c'est-à-dire en plein dans la craie, et à 36 mètres au-dessous du sol en même temps qu'à 25 mètres sous la surface actuelle de l'eau, deux autres galeries, de 2,500 mètres de longueur chacune et de même section que la première, avec laquelle elles seront à angle droit, compléteront le réseau. Elles auront une pente, dirigée vers la galerie principale, de 1 mètre par 1,500 mètres. On pourra les développer, si cela était nécessaire, mais on compte que le système tel quel fournira une suffisante quantité d'eau, car on évalue le débit à 80,000 hectolitres par jour, ce qui représente environ 100 litres par habitant, en sus des ressources déjà existantes. »

Fontaine de Vaucluse. — Il existe dans la nature diverses sources ou fontaines importantes et célèbres, provenant du drainage naturel des terrains perméables. Ainsi que nous l'avons déjà dit, l'existence de pareilles fontaines trouve son explication uniquement dans la constitution géologique du pays. Nous en donnerons deux exemples :

1° Le mont Ventoux, qui se dresse dans le département de Vaucluse, s'élève à l'altitude de 1,960 mètres ; sa base est une ellipse dont le grand axe, dirigé de l'est à l'ouest, a 25 kilomètres de long et le petit axe, dirigé du nord au sud, a 7,500 mètres, ce qui donne une superficie de 15,000 hectares. Le Ventoux est un massif calcaire éminemment perméable (terrain néocomien) ; sa surface n'est point ravinée et il absorbe une grande quantité de l'eau qu'il reçoit. A sa base, on ne trouve qu'une source importante, c'est la source du Groseau, à l'ouest, qui indique le niveau de l'assise imperméable qui supporte le massif calcaire : cette assise est donc inclinée de l'est à l'ouest et creusée en forme de vallée, puisque les eaux ne s'écoulent que par un seul orifice. Il tombe environ $0^m,85$ de hauteur de pluie sur la surface du Ventoux, ce qui correspond à un débit de 4 mètres cubes à la seconde pour la superficie entière. Le débit des sources est à peu près

de 2 mètres cubes ; elles représentent donc à peu près la moitié de la pluie tombée.

2° De même, la fontaine de Vaucluse n'est que l'exutoire d'un vaste bassin de calcaire néocomien de 70 kilomètres de longueur, qui s'étend jusqu'à Sisteron, sur une superficie de 96,500 hectares. C'est un plateau élevé sur lequel il tombe $0^m,80$ environ de pluie par an, ce qui représente pour la superficie totale un débit de 24 mètres cubes à la seconde.

La fontaine de Vaucluse donne un débit de 10 à 12 mètres cubes, c'est-à-dire environ la moitié du cube de l'eau de pluie que recueille le bassin.

L'allure du débit des sources est intimement liée à l'épaisseur de la couche filtrante que les eaux pluviales ont à parcourir : si la couche filtrante est mince, les sources seront très-sensibles à la sécheresse et présenteront un débit essentiellement variable ; si la couche est épaisse, comme la circulation de l'eau y est fort ralentie, l'influence de la sécheresse met beaucoup de temps à se faire sentir, les sources sont pérennes et régulières.

On trouve bien des exemples de drainage naturel dans les tranchées qu'on ouvre pour des routes ou des chemins de fer ; au-dessus de chaque assise argileuse se présente un niveau d'eau dont il faut recueillir les suintements pour les empêcher de dégrader les talus.

Distribution d'eau de Hagueneau. — La ville de Hagueneau est dominée à l'ouest par le coteau de Bellevue ; ce coteau est formé d'une couche de sable diluvien reposant sur de l'argile tertiaire qui se relève brusquement du côté de la vallée de la Moder ; les eaux d'infiltration sont donc arrêtées et maintenues dans le sable par le bourrelet argileux qui se relève sur le flanc du coteau.

Pour les recueillir, on avait établi, en 1733, une conduite souterraine en pierre de taille, formée d'une cuvette de $0^m,18$ de profondeur et $0^m,32$ de large, recouverte par des dalles de $0^m,08$ d'épaisseur ; cette conduite, de 200 mètres de longueur, n'est point maçonnée, et les eaux qu'elle reçoit sont amenées dans un réservoir en maçonnerie, où vient les prendre une conduite en fonte. Cette conduite passe aujourd'hui en siphon sous la ligne des chemins de fer de l'est.

Lorsqu'on a ouvert la tranchée du chemin de fer, on a coupé le bourrelet argileux, on a donné un écoulement vers la Moder à l'eau d'infiltration de la masse sableuse, et, la sécheresse aidant, en 1857, les fontaines sont venues à tarir.

M. l'ingénieur Pugnières leur a rendu de l'eau en prolongeant l'ancien drainage de 402 mètres avec des tuyaux ordinaires de drainage, de $0^m,10$ de diamètre intérieur, posés dans des tranchées de 2 mètres à $2^m,50$ de profondeur. Les tuyaux de drainage sont chanfreinés à leurs extrémités, ils reposent sur une aire de glaise de $0^m,10$ d'épaisseur, et les joints sont préservés de l'introduction du sable par un bourrelet de glaise de $0^m,05$, fortement pilonné.

Il se développe dans ces conduites des végétations abondantes ; aussi s'est-on ménagé la possibilité d'un fréquent nettoyage en plaçant des regards à tous les changements de direction et tous les 50 mètres dans les parties rectilignes.

Le travail est revenu à 2 fr. 75 c. le mètre courant.

Il est donc facile en le développant de satisfaire à tous les besoins.

CITERNES

L'usage des citernes, assez répandu en Hollande et en Allemagne, ne l'est guère en France ; les citernes sont cependant susceptibles de rendre de grands services dans les pays dépourvus d'eau, où les puits sont profonds et de faible puissance.

Les citernes sont alimentées par les eaux pluviales qui tombent sur les toits et que recueillent les gouttières.

A la suite d'une sécheresse un peu longue, il convient de ne pas laisser arriver à la citerne les premières eaux recueillies parce qu'elles entraînent les poussières et les matières organiques qui se sont déposées sur les toits ; cette précaution est facile à prendre, il n'y a qu'à manœuvrer un robinet.

La construction des citernes est aujourd'hui simple et relativement peu coûteuse, grâce aux chaux hydrauliques et aux ciments dont on dispose; il importe que les parois soient imperméables afin que les eaux du sol, toujours impures dans le voisinage des habitations, ne pénètrent point dans la citerne. La citerne doit être voûtée et en partie enfouie dans le sol, pour que l'eau se tienne fraîche et échappe à la gelée ; les terres de la fouille seront employées à contre-buter les murs latéraux et à recouvrir la voûte.

L'eau se clarifie dans la citerne; les matières lourdes tombent au fond, les matières légères viennent à la surface, le tuyau d'aspiration de la pompe doit déboucher à un niveau intermédiaire.

Il convient de ménager un grand accès à l'air dans les citernes; elles doivent donc être munies de soupiraux, et il ne serait point mauvais d'en agiter de temps en temps les eaux par un moyen mécanique ; en effet, la fermentation des substances organiques se développe toujours dans une eau stagnante, et si elle ne se fait point à l'aide de l'oxygène de l'air, elle prend celui des sulfates qu'elle décompose en dégageant de l'acide sulfhydrique ; l'eau devient infecte et impropre à l'alimentation.

Si l'eau de citerne n'est pas agréable à boire, c'est en somme une eau douce qui rend de grands services pour les usages domestiques et pour la cuisson des légumes. On peut aller chercher au loin ou dans un puits profond l'eau qui sert à la boisson, et recourir pour tout le reste à l'eau de la citerne.

Un propriétaire qui voudrait disposer de 500 litres d'eau par jour, dans un pays où la hauteur de pluie annuelle est de 1 mètre, devrait recueillir par des gouttières l'eau qui tombe sur 180 mètres carrés, et construire une citerne de 180 mètres cubes, soit 3 mètres de profondeur, 15 mètres de long et 4 mètres de large. C'est, en somme, une assez faible dépense pour un grand avantage, et il est étonnant que l'usage des citernes ne soit pas plus répandu dans certains pays. Il va sans dire que le calcul précédent est basé sur une moyenne et que, dans les grandes sécheresses, on pourra être conduit à ménager l'eau de la citerne.

Il convient de diviser les grandes citernes en deux ou plusieurs compartiments, afin de pouvoir vider, nettoyer et réparer l'un d'eux pendant que les autres restent pleins.

Il convient aussi de ménager à la partie haute des citernes un déversoir ou trop plein pour l'écoulement des eaux surabondantes.

Citernes filtres de Venise. — A Venise, où l'on comprend bien que l'usage des citernes est très-répandu, l'eau pluviale est répartie à la surface d'une excavation remplie de sable, où cette eau pénètre. La partie centrale de l'excavation est occupée par un puits dont les parois en brique sont imperméables, si ce n'est à la partie basse où elles sont percées de trous. C'est dans ce puits central que plonge le tuyau d'aspiration de la pompe.

Le sable qui entoure le puits est placé, avons-nous dit, dans une excavation du sol; les parois de l'excavation sont maintenues par une carcasse en charpente en avant de laquelle est appliqué un bon corroi en argile.

On réalise de la sorte tout à la fois le filtre et la citerne.

PUITS ORDINAIRES

Les puits sont d'un usage général ; on les rencontre dans toutes les maisons de quelque importance. Ils sont dans beaucoup de pays le seul mode d'alimentation en eau potable.

Nous ne dirons rien de la manière dont on doit les construire; on trouvera à cet effet tous les détails nécessaires dans notre *Traité de la construction des souterrains*. Nous ferons remarquer seulement qu'on a fréquemment à forer les puits dans des roches calcaires relativement tendres, et qu'il conviendrait de substituer à l'ancien fleuret à main les tarières à manivelle, qui donnent un travail rapide et économique.

Les eaux de puits tiennent en dissolution les matières minérales de la couche de terrain dans laquelle elles prennent naissance; elles sont quelquefois lourdes à digérer et trop chargées de calcaire ou de sulfate de chaux; elles ont l'avantage de la fraîcheur et constituent une boisson agréable.

Insalubrité des puits des villes. — Malheureusement, dans les villes l'eau des puits se corrompt rapidement et cesse d'être potable.

« En effet, dit M. de Freycinet dans son *Traité de l'assainissement industriel*, diverses causes tendent à altérer la qualité des eaux. Premièrement, les matières organiques répandues à la surface du sol, et provenant soit des maisons, soit du mouvement de la rue, s'infiltrent peu à peu dans le sol et même à travers les joints des pavés.

Les eaux pluviales agissent incessamment pour les faire pénétrer davantage et finissent par les amener au contact des sources souterraines. En second lieu, les égouts, les fosses d'aisances, les fosses à fumier, les puisards et autres dépôts d'ordures, qui sont situés à une certaine profondeur, livrent passage à des infiltrations d'autant plus promptes à s'étendre qu'elles ne rencontrent pas devant elles un sol battu ou empierré comme à la surface. D'autre part, les cimetières, quand il en existe à proximité des villes, constituent pour les puits un voisinage des plus dangereux ; car le terrain où se décomposent les cadavres, constamment remué par l'ensevelissement, est très-perméable aux eaux superficielles et leur abandonne des éléments organiques de la pire espèce. Une autre cause très-énergique et très-générale d'infection réside dans les conduites du gaz de l'éclairage, dont les fuites imprègnent peu à peu le sol de produits fétides et finissent par former une couche noirâtre qui s'étend sous l'emplacement entier des villes. Il est à peu près impossible aujourd'hui que les eaux superficielles

pénétrent dans les profondeurs du terrain sans avoir traversé sur quelque point cette couche impure. Enfin une foule de substances d'origines diverses sont introduites journellement dans le sol, par suite de circonstances qu'il serait trop long d'énumérer. Les villes situées, par exemple, dans le voisinage d'exploitations souterraines sont exposées à ce que les couches sous-jacentes soient envahies par les liquides ou les gaz impurs qui proviennent de ces exploitations. Les opérations industrielles engendrent également de graves phénomènes de corruption.

Sans parler des résidus que les fabriques écoulent incessamment, les réceptacles dans lesquels elles conservent leurs produits et qui consistent fréquemment en citernes ou réservoirs creusés dans la profondeur du sol, donnent lieu à des filtrations plus ou moins étendues.

Dans un autre ordre d'idées, on doit citer deux causes d'altération des eaux, qui tiennent non à la présence de telle ou telle espèce de matière, mais aux conditions inhérentes à l'existence même des villes.

L'une de ces causes est le manque d'oxygène atmosphérique dans l'intérieur du sol. On sait, en effet, que cet oxygène est indispensable à la salubrité des eaux souterraines, soit pour les aérer, soit pour brûler les substances organiques qui ont pénétré dans leur voisinage et qui, faute d'oxygène, engendrent les phénomènes connus de réduction des sulfates avec le dégagement d hydrogène sulfuré qui en est la conséquence. Or, dans les villes, deux circonstances majeures contribuent à empêcher la pénétration de l'air atmosphérique. D'une part, la plus grande partie de la surface étant bâtie, pavée et empierrée, et en tous cas fortement battue par la circulation, l'air extérieur a évidemment beaucoup moins d'accès dans le sol. D'autre part, le fer détaché des roues de voiture et des fers des chevaux, à cause précisément de sa grande division, s'oxyde avec une extrême facilité et dès lors arrête l'oxygène au passage, et en même temps le fer, qui s'est sulfuré au sein de la terre et des eaux non aérées, par suite de la décomposition des sulfates, a également une grande tendance à absorber l'oxygène gazeux, et agit par suite dans le même sens.

La seconde cause d'altération des eaux résulte de l'absence de lumière solaire. Le contact de cet agent exerce, on le sait, une très-grande influence sur la combustion lente des substances organiques. C'est ce que prouvent, notamment, la conservation des matières colorantes, quand elles sont mises à l'abri de la lumière, et la destruction de ces mêmes matières, même à l'état solide, quand elles y sont, au contraire, exposées au sein de l'atmosphère. Or, il est évident que la circonstance physique générale qui s'oppose à l'introduction de l'air dans le sol, s'oppose également à l'arrivée de la lumière. Il y a plus; c'est que la lumière est interceptée en bon nombre de cas où l'air peut pénétrer. Tel est le cas, par exemple, des caves et des allées de maisons, où le sol n'est point pavé ni dallé; l'oxygène y trouve toujours quelques facilités pour s'introduire, tandis que les rayons solaires en sont bannis absolument. Il en est de même de beaucoup de hangars et ateliers où le sol est plus ou moins pénétrable à l'air, tandis que la lumière est arrêtée par les objets qui les garnissent.

Des diverses causes d'insalubrité que nous venons d'énumérer, les unes peuvent être combattues avec succès; les autres, dans l'état présent de nos connaissances, ne le sont qu'imparfaitement ou même ne le sont pas du tout. On n'a, par exemple, aucun moyen d'empêcher les eaux sales circulant à la surface de pénétrer dans le sol, car aucun mode de pavage ou d'empierrement actuellement en usage ne supprime les joints ou fissures. De même, on n'est pas encore parvenu

à éviter les fuites du gaz; à la vérité, on a indiqué des procédés dans ce but ; mais certains, seraient tout à fait inefficaces, et quant aux autres, les difficultés d'exécution ou le coût de la dépense se sont jusqu'ici opposés à leur adoption. Bref, il existe et il existera vraisemblablement toujours, des causes puissantes d'infection qui, dans l'enceinte des cités populeuses, tendront à agir sur les puits. On ne peut donc pas compter sur eux pour une alimentation régulière. Dans les villes mêmes où des circonstances géologiques particulièrement favorables garantissent la pureté des nappes souterraines, les puits n'offrent qu'une ressource insuffisante, car s'ils fournissent l'eau potable et même celle des usages domestiques, ils ne sauraient donner celle que réclament la propreté de la maison, les opérations industrielles et surtout le service de la voirie. Ainsi, les localités qui ont l'avantage de posséder de bons puits ne sont pas pour cela dispensées de recourir à d'autres eaux.

Mais si le rôle des puits est destiné à s'effacer de plus en plus dans l'alimentation, ils sont, par contre, susceptibles de rendre quelques services comme moyen d'assainissement des villes. Il est évident, en effet, que par l'appel incessant qu'ils font des eaux autour d'eux, ils favorisent, dans les interstices du sol, la circulation et des eaux et de l'air. Tout filet d'eau qui s'écoule est inévitablement remplacé par un filet d'eau égal ou par un pareil volume d'air ; dès lors, il se produit dans le sol un renouvellement qui tend à prévenir la fermentation putride des matières organiques. Ce qui le montre au surplus, c'est que très-souvent les puits, dans les premiers temps qui suivent leur creusement, ne donnent pas de bonne eau potable, tandis qu'à la longue cette eau s'améliore et finit par devenir tout à fait salubre : preuve que les matières altérantes situées dans le voisinage du puits ont été graduellement détruites ou entraînées par suite du renouvellement de l'eau. Nous remarquons en ce qui concerne les puits, que leur efficacité est subordonnée à deux conditions principales. La première, c'est que l'eau soit extraite du puits fréquemment, sans quoi le renouvellement n'est pas assez sensible; en d'autres termes, le puits doit être en service régulier comme moyen alimentaire. En second lieu, la nappe d'approvisionnement doit être en relation avec la surface, soit par l'intermédiaire de fissures ou d'interstices, soit par suite de la perméabilité des roches ; car, si le déplacement de l'eau s'exerce dans une région indépendante des couches superficielles, les phénomènes d'assainissement pourront bien, à la vérité, s'exercer au profit du puits considéré comme moyen d'alimentation, mais non au profit du sol même, qui supporte les maisons. Malheureusement cette seconde condition est bien souvent incompatible avec celles qui font la bonne qualité des eaux ; en sorte qu'on ne peut pas espérer de grands services, pour la salubrité, précisément des puits dont on use le plus pour les besoins domestiques. Les puits appelés à agir sur la salubrité du sol sont donc surtout ceux qu'on affecte à l'arrosage des jardins et à des opérations industrielles, car ceux-là peuvent être en service fréquent, tout en ne fournissant pas de très-bonne eau potable. Mais, il faut bien le reconnaître, le rôle de plus en plus effacé des puits dans l'approvisionnement des villes tend par là même à diminuer beaucoup leur influence sur l'assainissement. Ce n'est guère que dans les petites localités qu'ils pourront continuer à garder de l'importance. »

Puits instantanés. — Il existe souvent à quelques mètres au-dessous du sol des eaux abondantes, provenant de l'infiltration soit des eaux pluviales soit des eaux d'une rivière voisine. Néanmoins, il n'est pas facile avec les procédés ordinaires d'arriver rapidement jusqu'à ces eaux : le forage et le muraillement des

puits dans un sol plus ou moins vaseux et sablonneux sont des opérations longues, coûteuses et quelquefois dangereuses, même lorsqu'il ne s'agit que de faibles profondeurs.

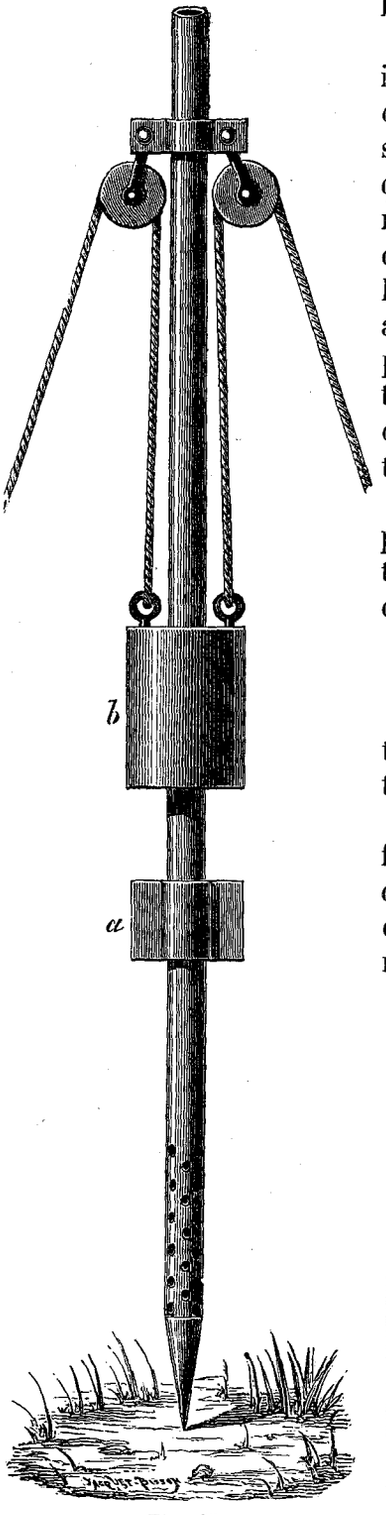

Fig. 23.

Le puits instantané Norton supprime tous ces inconvénients. Il se compose, figure 23, d'un tube creux en fer, garni à son extrémité d'une pointe ou sabot, et percé à sa partie inférieure d'une certaine quantité de trous; on enfonce ce tube à l'aide d'un mouton ou d'un fort maillet à plusieurs branches, comme on le ferait pour un pieu ordinaire. Lorsque la pointe est arrivée à la profondeur voulue, on ajuste sur le sommet du tube vertical une petite pompe en fonte que l'on fait manœuvrer ; elle entraîne d'abord une eau boueuse et peu abondante, qui peu à peu s'éclaircit et finit par couler à plein tuyau.

En effet, l'aspiration qui se fait par les trous percés à la base du tube, entraîne les molécules terreuses adjacentes, et il se crée bientôt une poche ou cavité qui se remplit d'eau pure.

Le diamètre extérieur du tube est de $0^m,046$.

— intérieur — $0^m,032$.

La surface totale des trous, percés sur une hauteur de $0^m,70$ est égale à une fois et demie la section intérieure du tube.

Le premier tube a $3^m,50$ de longueur, mais il est facile de l'allonger au moyen d'autres tubes de chacun un mètre de long, taraudés à une extrémité et filetés à l'autre de façon à s'emboîter et à se réunir les uns aux autres.

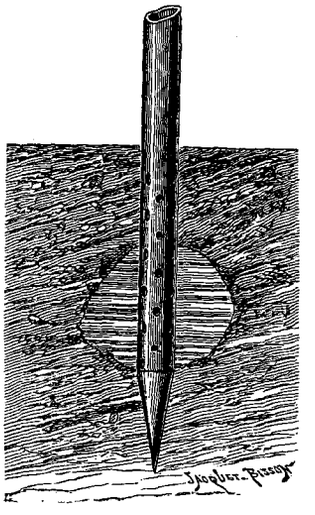
Fig. 24.

Pour enfoncer le tube, on le serre au moyen de deux écrous dans un collier *a*, dont la gorge intérieure est filetée afin de bien adhérer au tube, et on frappe sur le collier au moyen d'un mouton *b* disposé comme l'indique la figure ; ce mouton est creux et traversé par le tube qui le guide dans son mouvement.

Ce système spécial convient bien aux armées en campagne ou dans les exploitations où l'on est exposé à changer fréquemment le puits de place.

Lorsqu'on voudra poser un puits instantané à demeure fixe, on pourra enfoncer le tube à l'aide d'un fort mouton en bois ou d'un petit mouton en fer frappant sur un collier qui entoure et protége la tête du tube.

Nous le répétons, ce puits est très-avantageux à établir dans les vallées d'alluvion : nous en avons construit un qui a parfaitement réussi.

Un puits instantané de 3 mètres de profondeur avec sa petite pompe en fonte peut revenir à 125 francs et un puits de 9 mètres à 250 francs.

Il est à remarquer que dans certains cas on pourra obtenir par le procédé que nous venons de décrire une eau jaillissante.

THÉORIE DES PUITS

La théorie mathématique des puits ordinaires et des puits artésiens n'a guè été traitée que par Dupuit et Darcy. C'est d'après eux que nous en donnerons les principaux traits.

Nous ne nous occuperons que des puits alimentés par des couches perméables, et non point de ceux qui peuvent tirer leurs eaux de courants souterrains circulant dans les cavités intérieures du sol ; nous aurons l'occasion plus loin de donner quelques détails sur ces courants.

Écoulement à travers un terrain perméable. — Le point de départ de la théorie des puits est la loi qui règle l'écoulement de l'eau à travers un terrain perméable. En abordant la question du filtrage, nous avons rapporté les expériences de Darcy sur l'écoulement de l'eau à travers le sable.

Pour un terrain perméable donné, le volume (q) débité par mètre carré est *proportionnel à la charge* (h) *et en raison inverse de l'épaisseur* (e) *de la couche traversée.*

D'où l'expression :

$$q = k\frac{h}{e}$$

la fraction $\left(\frac{h}{e}\right)$ n'est autre que la perte de charge j par mètre de parcours de l'eau à travers la couche perméable ; le débit q par mètre carré est évidemment proportionnel à la vitesse u d'écoulement. Donc l'équation précédente peut se mettre sous la forme :

$$j = \mu . u \qquad (1)$$

dans laquelle μ est un nombre constant, qui dépend de la porosité de la couche perméable ; à la page 72 nous avons calculé diverses valeurs de ce coefficient.

Calcul d'un puits ordinaire. — Considérons un massif sablonneux *cdef* limité à un cylindre vertical et entouré d'eau de toutes parts ; au centre de ce massif on perce un puits *ab* (fig. 25). Le massif repose sur une couche imperméable et la hauteur d'eau qui le baigne de toutes parts est égale à H. Si l'on ne tire point d'eau du puits, l'équilibre hydrostatique s'établit et le niveau d'eau s'élève dans ce puits jusqu'à l'horizontale *cd*, c'est-à-dire à la hauteur H.

Si l'on vient maintenant à extraire du puits un volume q par seconde, il faudra, pour l'alimentation, qu'un courant s'établisse de la périphérie au centre du massif filtrant ; la production de ce courant entraîne une perte de charge, une chute du liquide, et la surface du liquide en mouvement dans le sable se rappro-

chera d'un tronc de cône ayant pour grande base le cercle de diamètre *cd* et pour petite base le cercle de diamètre *ab*. La section méridienne donnera pour la

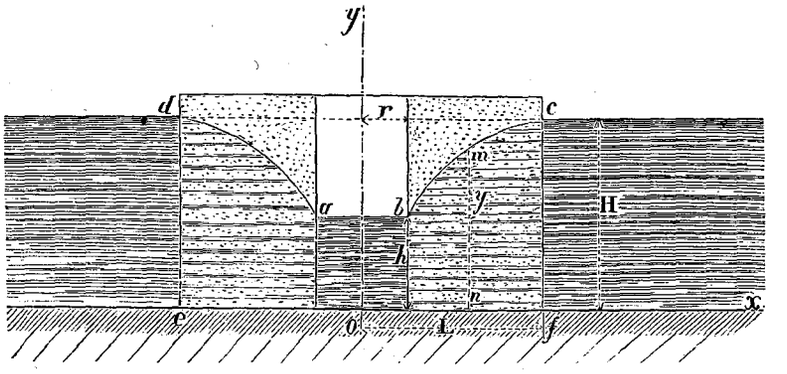

Fig. 25.

surface de l'eau une courbe telle que *bc*; à mesure que le débit q, exigé du puits, augmentera, la courbure de *cb* s'accentuera et le point *b* descendra dans le puits.

Désignons par L le rayon du massif filtrant et par r le rayon du puits; ce dernier est généralement très-faible par rapport au premier.

Prenons pour axes de coordonnées *oy* et *ox*; au point *m* de la nappe souterraine, quelle est la valeur de la perte de charge j par mètre courant?...

Lorsqu'on passe du point *m* au point voisin, la chute est égale à dy et le chemin parcouru est égal à dx, donc

$$j=\frac{dy}{dx}$$

et l'équation (1) devient :

$$\frac{dy}{dx}=\mu.u \qquad (2)$$

Considérons, d'un autre côté, une section cylindrique du massif, section ayant pour axe l'axe du puits et pour génératrice la verticale *mn*; désignons par m le rapport du vide au plein que présente le massif sablonneux; le débit de la nappe souterraine suivant la section cylindrique précédente sera représenté par $2.m.\pi.x.y.u$, et, comme le débit doit compenser le volume q que l'on retire du puits, nous avons l'équation :

$$2m\pi xyu=q \qquad (3)$$

Éliminant u entre les équations (2) et (3) nous trouvons, pour l'équation différentielle de la courbe *bc* l'expression :

$$\frac{dy}{dx}=\frac{\mu}{2m.\pi}\cdot\frac{q}{xy} \quad \text{ou} \quad (4)\ 2ydy=\alpha.q.\frac{dx}{x}$$

Le nombre α représente la quantité constante $\frac{\mu}{m.\pi}$.

Il est facile d'intégrer l'équation (4), car $(2ydy)$ est la dérivée de (y^2) et $\left(\frac{dx}{x}\right)$ est la dérivée du logarithme népérien de x.

En outre,

$$\begin{array}{lll} y=h & \text{pour} & x=r \\ y=\mathrm{H} & \text{pour} & x=L \end{array}$$

ce qui nous donne :

$$(5)\quad \begin{cases} y^2-h^2=\alpha.q.\ \log.\frac{x}{r} \\ y^2-\mathrm{H}^2=\alpha.q.\ \log.\frac{x}{\mathrm{L}} \end{cases}$$

L'équation de la courbe est donc de la forme :

$$(6)\qquad \frac{y^2-h^2}{\mathrm{H}^2-h^2}=\frac{\log.\frac{x}{r}}{\log.\frac{\mathrm{L}}{r}}$$

et, en retranchant l'une de l'autre les deux équations (5) on trouve pour le débit :

$$(7)\qquad q=\frac{\mathrm{H}^2-h^2}{\alpha}\cdot\frac{1}{\log.\left(\frac{\mathrm{L}}{r}\right)}$$

L'équation (6) ne renferme ni q ni α, la courbe est donc indépendante du débit du puits et de la porosité de la couche perméable ; elle ne dépend que des hauteurs d'eau à l'extérieur dn massif et dans le puits, ainsi que du rayon du puits et de la largeur du filtre.

Quant au débit q, il varie non-seulement avec les quantités précédentes, mais encore avec le coefficient α, c'est-à-dire avec la porosité du sol.

Ce débit q est proportionnel à (H^2-h^2) ou à $(\mathrm{H}-h)\ (\mathrm{H}+h)$, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la charge $(\mathrm{H}-h)$ et à l'épaisseur moyenne $\left(\frac{\mathrm{H}+h}{2}\right)$ de la couche filtrante.

Lorsque le diamètre du puits et l'étendue L de la couche filtrante varient proportionnellement, le débit ne change pas.

Peu d'influence du rayon du puits. — L'équation (7) nous apprend que le débit varie en raison inverse $\log.\frac{\mathrm{L}}{r}$ ou de $\log.\mathrm{L}-\log.r$; il augmente donc avec le rayon du puits ; mais contrairement à l'opinion courante, contrairement à ce qu'on est tenté de croire au premier abord, l'augmentation de débit est très-faible eu égard à l'augmentation du rayon, dès que la largeur L de la couche filtrante atteint une valeur notable, cas ordinaire dans la nature.

Généralement, quelle que soit la valeur de r, elle est toujours faible par rapport à L.

Prenons $\mathrm{L}=100^{\mathrm{m}}$, et $r=1^{\mathrm{m}}$, si nous doublons le rayon du puits, le nou-

veau débit q' sera à l'ancien débit q, dans le rapport :

$$\frac{q'}{q}=\frac{1-\log\left(\frac{r}{L}\right)}{1-\log\left(\frac{2r}{L}\right)}$$

ce qui donne, grâce aux tables de logarithmes népériens :

$$q'=1{,}17.q$$

Il ne faut donc pas chercher à donner aux puits des diamètres plus grands que ceux qui conviennent à un travail facile et à une bonne installation des machines élévatoires.

Ce résultat, qui paraît bizarre au premier abord, n'a rien d'étonnant si on réfléchit que, la charge étant constante et l'épaisseur de la couche filtrante à traverser par les eaux étant sensiblement constante aussi, puisqu'elle est très-grande par rapport au rayon du puits, la puissance de débit de cette couche est nécessairement limitée comme l'est celle du filtre en pierre de nos fontaines domestiques. Tout le monde sait que, pour obtenir une plus grande quantité d'eau filtrée, il est parfaitement inutile d'augmenter le nombre des robinets, la surface de la pierre poreuse ne laissera toujours passer que la quantité d'eau, qui correspond à son épaisseur et à la charge qui la surmonte.

Le calcul précédent suppose que le puits est foncé jusque sur l'assise imperméable, et qu'il n'est alimenté que par sa paroi latérale ; s'il n'en est pas ainsi, l'alimentation se fait aussi par le fond, et le débit peut alors augmenter avec la section horizontale du puits. Néanmoins, l'augmentation n'est pas très-rapide.

Sans attacher aux indications théoriques précédentes une valeur considérable, on doit les considérer comme peu éloignées de la vérité.

Définition du puits artésien. — Bien que la définition des puits artésiens soit connue, il convient de la préciser ici.

Les assises successives qu'on rencontre en descendant le sol sont tantôt perméables, tantôt imperméables ; elles ont été courbées et redressées par le soulèvement des montagnes. Les assises soulevées apparaissent au jour sur les flancs des montagnes qui les ont déchirées, et ce sont les plus anciennes qui se trouvent le plus près des lignes de faîte.

Considérons figure 26, une assise perméable b comprise entre deux assises imperméables a et c ; les eaux pluviales qui tombent sur l'affleurement de la couche b, s'infiltrent et tendent à descendre au point le plus bas de la cuvette, elles sont toujours maintenues entre les deux couches a et c, qui forment comme les parois d'une immense conduite forcée.

Si l'on vient, par un forage vertical mn à percer l'assise a et à pénétrer dans la couche aqueuse b, l'eau s'élèvera dans le tube piézométrique mn jusqu'à l'altitude xx de l'affleurement de l'assise perméable b ; si l'on vient à couper le tube piezométrique en m, la perte de charge mx se traduira par une production de vitesse, un courant s'établira dans la couche filtrante b et dans le tube vertical mn.

On aura un puits artésien, dont le débit dépendra de la hauteur mx que l'on aura enlevée au tube piézométrique.

S'il existe au-dessous de l'assise imperméable c une nouvelle couche filtrante d, dont l'affleurement est en y et qu'on descende jusqu'à cette couche un tube

vertical, l'eau s'élèvera jusqu'à un niveau piézométrique yy, et si le tube est coupé en p, un courant s'établira dans la couche d et dans le tube pq.

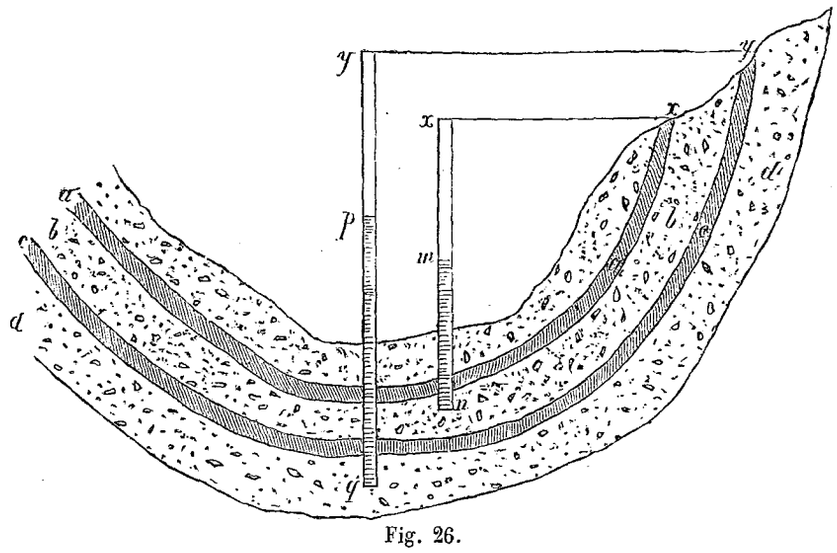

Fig. 26.

Ce courant pourra être plus puissant que le courant mn et posséder un niveau piézométrique plus élevé, mais cela n'est pas certain, et on n'est pas toujours assuré de trouver un plus grand débit en descendant plus profondément.

Théorie du puits artésien. — Nous allons présenter, d'après Dupuit, la théorie du puits artésien, théorie analogue à celle des puits ordinaires. Nous désignons par L la largeur de la nappe perméable qui entoure le puits, r le rayon du puits, e l'épaisseur moyenne de la couche perméable, H la hauteur

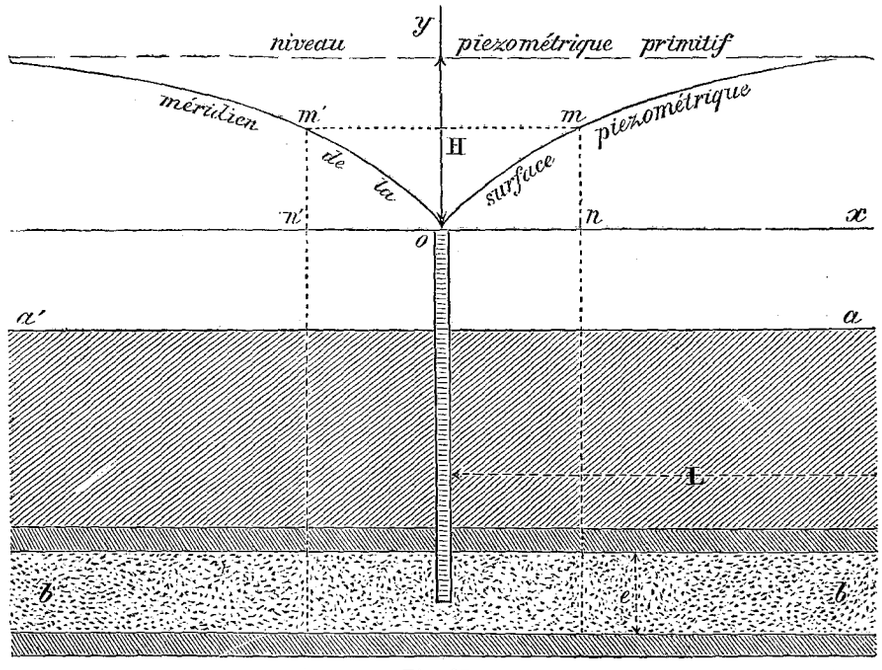

Fig. 27.

à laquelle est coupé le tube artésien au-dessous du niveau piézométrique, c'est-à-dire du niveau auquel l'eau s'élèverait dans un tube indéfini.

Nous prenons pour axes de coordonnées l'horizontale ox et la verticale oy.

Quand le tube artésien est coupé en o, l'eau s'écoule avec une certaine vitesse, le courant souterrain se creuse comme un entonnoir dont le puits serait le centre, et dont la ligne méridienne serait une courbe telle que om, se raccordant à une distance plus ou moins considérable, avec l'horizontale du niveau piézométrique primitif.

Considérons la section faite dans la couche filtrante bb par le cylindre vertical, dont les génératrices sont mn $m'n'$ et désignons par u la vitesse d'écoulement de l'eau, qui traverse la périphérie de ce cylindre.

m est le rapport du vide au plein dans la couche considérée, c'est-à-dire le rapport dans lequel il faut réduire la section totale pour avoir la section d'écoulement.

Lorsqu'on passe du point m à un point voisin, la perte de charge est dy et l'intervalle parcouru dx, la perte de charge j par mètre courant est donc la limite du rapport $\left(\frac{dy}{dx}\right)$, et d'après l'équation (1) de la page 124, nous avons :

$$\frac{dy}{dx} = \mu . u$$

Si q est le débit par seconde, la vitesse u du liquide qui traverse la surface cylindrique mn $m'n'$ est égale à

$$\frac{q}{m . 2\pi . e . x}$$

donc :

$$dy = \frac{\mu}{2m\pi} \cdot \frac{q}{e} \cdot \frac{dx}{x}$$

Si l'on intègre cette équation, en remarquant que : pour $x = r$, $y = o$ et que pour $x = \mathrm{L}$, $y = \mathrm{H}$, on trouve

$$y = \frac{\mu}{2m\pi} \cdot \frac{q}{e} \log. \left(\frac{x}{r}\right)$$

$$y - \mathrm{H} = \frac{\mu}{2m\pi} \frac{q}{e} \log. \left(\frac{x}{\mathrm{L}}\right)$$

Divisant ces deux équations l'une par l'autre, il vient :

(1) $$y = \mathrm{H} \frac{\log. x - \log. r}{\log. \mathrm{L} - \log. r}$$

(2) $$q = \frac{2\pi me}{\mu} \frac{\mathrm{H}}{\log. \left(\frac{\mathrm{L}}{r}\right)}$$

D'après l'équation (1) la courbe des niveaux piézométriques ne dépend ni du débit, ni de l'épaisseur de la courbe filtrante, ni de sa perméabilité.

D'après l'équation (2) le débit est proportionnel à l'épaisseur de la couche filtrante, à sa perméabilité et à la charge, c'est-à-dire à la dénivellation qui existe entre l'orifice du tube artésien et la hauteur piézométrique primitive.

La proportionnalité du débit et de la charge a été démontrée par plusieurs expériences.

Le débit est en raison inverse de la différence des logarithmes de L et de r; le rayon r est toujours petit par rapport à la largeur L de la couche filtrante; son logarithme peut donc être négligé en présence du logarithme de L, ce qui conduit à dire que le débit d'un puits artésien *est indépendant du rayon de ce puits*.

Il va sans dire que ce résultat, en l'admettant comme exact, ne saurait être appliqué à des tubes de très-petit diamètre, car ces tubes offrent au mouvement ascendant de l'eau une résistance considérable qui influe sur le débit.

Perte de charge totale. — Il est, du reste, facile d'apprécier la diminution que la résistance du tube vertical apporte dans le débit.

Soit l la profondeur du puits artésien; la formule (5) de la page 14 nous apprend que la perte de charge produite par les frottements dans le tube de rayon r et de longueur l est égale à

$$\frac{b_1 q^2 l}{\pi^2 . r^5},$$

cette perte de charge vient en diminution de la charge H qui produit l'écoulement dans le puits artésien, et l'équation (2) doit s'écrire :

$$(3) \qquad q = \frac{2\pi . m . e}{\mu} \frac{1}{\log . \frac{L}{r}} \left(H - \frac{b_1 q^2 l}{\pi^2 r^5} \right)$$

Pour calculer la valeur de q, on prendra d'abord celle que donne l'équation (2) et on la substituera dans le second membre de l'équation (3), ce qui donnera une valeur plus approchée du débit. En général, cet essai suffira, car la perte de charge due au mouvement dans le tube vertical est très-faible par rapport à la charge totale H.

Importance pratique des grands diamètres pour les puits artésiens. — La théorie précédente nous conduit à penser que le débit des puits artésiens n'augmente guère avec le diamètre de ces puits, pourvu toutefois que ce diamètre ne soit pas assez petit pour entraîner des frottements considérables.

En réalité, la théorie n'est pas toujours confirmée par les faits : le puits de Passy a donné un débit bien supérieur à celui du puits de Grenelle ; il est vrai que l'augmentation de débit s'explique, suivant Darcy et Dupuit, par ce fait qu'on est allé chercher une couche filtrante plus profonde et plus épaisse.

On peut se demander si la dénivellation piézométrique se fait sentir sur une grande étendue et si, en réalité, L est très-grand par rapport à r; cela n'est pas prouvé, bien que deux puits artésiens puissent influer sur leur débit réciproque, même à grande distance.

La théorie précédente peut encore être attaquée par cette considération qu'il se forme presque toujours, à la base du tube artésien, une vaste poche, une excavation, une sorte de réservoir alimenté par une couche filtrante ; la courbe des niveaux piézométriques diffère donc de celle que nous avons considérée.

En outre, il existe dans les terrains perméables de véritables courants circulant dans des conduites fermées et irrégulières, et il peut arriver qu'un puits artésien rencontre un courant de ce genre, ce qui modifie profondément les lois de l'écoulement.

Quoi qu'il en soit, la théorie que nous avons donnée n'est pas absolument

vérifiée par l'expérience; elle paraît vraie néanmoins, car on peut expliquer par des circonstances particulières les anomalies qu'on rencontre.

En réalité, les praticiens n'ont pas adopté uniquement les petits diamètres; leur tendance est de recourir à des diamètres sans cesse croissants.

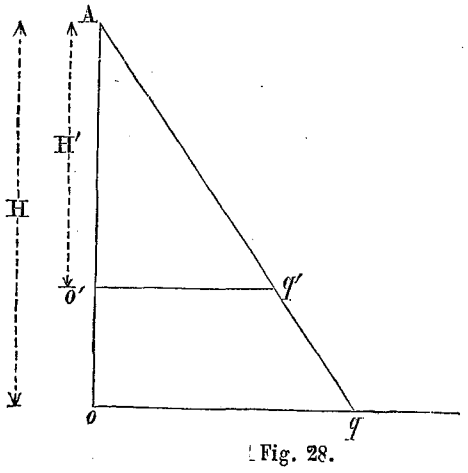

Fig. 28.

Il semble toutefois qu'en opérant ainsi, leur principal but est de rendre le travail plus facile et les accidents de tous genres, tels que les ruptures des instruments de sondage, moins pénibles à réparer.

Détermination du niveau piézométrique d'un puits artésien. — Il est facile par une simple construction graphique de déterminer le niveau piézométrique d'un puits artésien.

On coupe le tube artésien à une certaine altitude o (*fig.* 28), et on trouve expérimentalement un débit q; on le coupe ensuite à une autre altitude o' et on trouve un débit q'.

D'après la formule (2) ci-dessus, on doit avoir la relation :

$$\frac{q}{q'} = \frac{H}{H'}$$

On porte sur l'horizontale du point o une longueur mesurant le débit q, et sur l'horizontale du point o' une longueur mesurant le débit q'; on joint les extrémités q et q' des longueurs horizontales ainsi obtenues, et le point A où la droite qq' rencontre la verticale oo' est au niveau piézométrique cherché.

Ce niveau piézométrique n'est pas exact en général, car le tubage des puits artésiens est toujours très-imparfait; une partie de l'eau jaillissante monte entre l'extérieur des tubes et les parois du trou de sonde; elle disparaît dans les couches absorbantes; de même, il existe de nombreuses fuites et solutions de continuité dans la colonne tubulaire, et tout cela se traduit à la surface par une perte quelquefois considérable de débit, ce qui entraîne une réduction proportionnelle dans la valeur trouvée pour H.

La position du point A ne représente donc qu'un minimum du niveau piézométrique. C'est par des considérations géologiques et par l'examen des couches qu'a traversées le sondage qu'on peut déterminer d'une manière approximative le véritable niveau piézométrique.

Il est bon de déterminer de temps en temps la position de ce point A pour voir s'il ne s'abaisse point et si, par conséquent, quelques fuites nouvelles ne se manifestent point dans la colonne tubulaire.

Existence de courants souterrains. — L'existence de courants souterrains quelquefois considérables est mise en évidence par les faits suivants :

A $37^m,50$ au-dessous du sol, dans un puits artésien, à la Villette, la sonde est tombée brusquement de $3^m,50$, et le niveau d'eau ne s'est point abaissé, malgré l'action d'une machine d'épuisement de quarante chevaux.

Dans un puits de Tours descendu jusqu'aux sables verts, la nappe jaillissante a amené au jour des fragments d'épines et de graines, qui ont été semées et qui ont germé. S'il y avait eu simple filtration, ces matières solides n'auraient pas été entraînées.

Les eaux rencontrées dans les sables verts ramènent toujours des fragments de lignites, ainsi que des fossiles d'un volume quelquefois considérable.

Dans les forages, il y a souvent des chutes brusques de la sonde, et, lorsqu'on la relève, elle apparaît propre et claire, comme si elle avait été lavée dans un courant rapide.

L'existence de ce courant se manifeste du reste jusqu'à la surface par l'agitation et la trépidation que la sonde éprouve.

Constance du débit des puits artésiens. — Les puits artésiens profonds sont remarquables par la constance de leur débit.

Cette constance s'explique si l'on remarque que les puits de ce genre sont alimentés par les eaux pluviales qui s'infiltrent sur une grande étendue de pays ; les variations dans les hauteurs de pluie tombées, en admettant qu'elles aillent du simple au double, peuvent s'évaluer au maximum à une hauteur d'eau de $0^m,50$; supposez une assise dont le coefficient de perméabilité soit de 0,20, la hauteur de pluie de $0^m,50$ représentera une hauteur d'eau de $2^m,50$ dans le sol.

La variation de la charge H sera donc au plus de $2^m,50$, proportion généralement insignifiante, qui n'influera pas d'une manière sensible sur le débit du puits.

Existence d'une poche à la base des puits artésiens. — Il se forme à la base des puits artésiens une poche qui peut atteindre un volume considérable.

Ainsi, il est sorti environ 1000 mètres cubes de sable du puits de Grenelle.

La formation de cette poche paraît même indispensable, dans certains cas, à la production de la nappe jaillissante : en 1830, on avait exécuté à Saint-Denis un sondage qui devait avoir dépassé le niveau des eaux jaillissantes, néanmoins le liquide ne s'élevait pas. On descendit une pompe à 60 mètres de profondeur et on la fit manœuvrer pour déterminer un appel; elle amena d'abord une eau très-mélangée de sable, puis la proportion de sable diminua et, tout d'un coup, l'eau fit irruption brusque et jaillit à travers les clapets; l'écoulement n'a pas cessé depuis.

Forage des puits artésiens. — Les procédés de sondage ont été exposés dans notre *Traité de l'exécution des Travaux*, auquel le lecteur voudra bien se reporter.

Les progrès de ces dernières années ont été considérables ; on est descendu à des profondeurs inconnues jusque-là et l'on n'a pas craint d'exécuter des sondages de plusieurs mètres de diamètre.

DÉTAILS SUR QUELQUES PUITS ARTÉSIENS

Puits de Grenelle. — Les eaux du puits de Grenelle, comme celles des principaux puits artésiens forés dans le bassin de la Seine, proviennent des couches sablonneuses du grès vert, emprisonnées sous l'argile du gault. Cette argile est recouverte par la craie grise, au-dessus de laquelle se trouvent les assises de la formation tertiaire surmontées elles-mêmes par les terrains d'alluvion.

Le puits de Grenelle débouche à 37 mètres au dessus du niveau de la mer. Sa profondeur est de 549 mètres.

Les terrains d'alluvion ont $9^m,05$ d'épaisseur ;

Jusqu'à $10^m,50$	on trouve le sable	et l'argile plastique.
— $40^m,63$	—	des nodules calcaires.
— $41^m,54$	—	la craie calcaire.
— $336^m,78$	—	la craie grise.
— $505^m,00$	—	le gault.
— $545^m,00$	—	sables verts.

Le puits pénètre à 4 mètres de profondeur dans les sables verts.

L'argile verte du gault, qui représente le couvercle imperméable du réservoir souterrain, affleure dans toutes les directions autour de Paris ; on la trouve dans le voisinage des villes de Calais, Valenciennes, Sainte-Ménehould, Auxerre, Châtellerault, la Flèche, Nogent-le-Rotrou, Lisieux et Honfleur.

La ligne d'affleurement a plus de 300 kilomètres de développement ; elle est coupée par les grandes vallées et son altitude varie de 100 à 200 mètres au-dessus du niveau de la mer ; aux environs de Troyes, elle se trouve à 135 ou 140 mètres d'altitude. La largeur de la couche absorbante varie de 15 à 40 kilomètres.

Le forage du puits de Grenelle a été exécuté par M. Mulot ; cette opération commença le 28 décembre 1833, et l'eau jaillissante apparut le 26 février 1841 ; le travail ne fut terminé que le 20 juillet 1852.

Bien des contre-temps et des accidents, habilement surmontés, entravèrent l'exécution du travail.

A 115 mètres de profondeur, les tiges de sonde se rompirent et, pour les dégager, il fallut exécuter un second sondage à côté du premier.

Le tubage définitif devait être exécuté en tuyaux de cuivre de $0^m,003$ d'épaisseur et de 0,17 à $0^m,24$ de diamètre ; mais on s'aperçut qu'ils s'écrasaient sous la pression de l'eau extérieure ; ils se crevèrent, et l'eau, se perdant dans les couches perméables, n'arrivait plus jusqu'au sol.

Il fallut déchirer et enlever par morceaux les tubes écrasés, et une commission décida qu'on poserait un tubage en tôle galvanisée.

Mais, dans l'intervalle, il s'était opéré des mouvements dans les assises traversées, le forage avait perdu sa verticalité, et il fallut percer l'ancien tube pour poursuivre le forage en ligne droite, avec des tubes en tôle de 5 millimètres d'épaisseur et de $0^m,12$ de diamètre intérieur.

La sonde vint à casser et en 1851 on dut en enlever les morceaux en même temps qu'on remonta le tubage précédent.

En somme, le tuyau d'aspiration a un diamètre très-variable, qui n'est que de $0^m,17$ sur les 129 derniers mètres.

Encore, comme la partie la plus basse tendait sans cesse à se déverser, on dut l'enraciner dans les couches inférieures résistantes au moyen d'un pieu en fer descendu dans le tube ; l'eau n'arrive plus dans ce dernier que par les trous dont est percée la surface latérale, et la section d'écoulement se trouve réduite par la section quadrangulaire du pieu.

Néanmoins, après cette opération le débit augmenta plutôt qu'il ne diminua ; c'est là un argument bien sérieux en faveur de la théorie qui nous a enseigné que le débit ne croissait pas sensiblement avec le diamètre du puits.

Le débit du puits de Grenelle était, en 1861, de 10 litres par seconde ; lorsque le puits de Passy donna ses eaux le 25 septembre 1861, le débit du puits de

Grenelle tomba à 7 litres par seconde, ce qui se conçoit, car les deux puits sont en partie alimentés par la même couche.

Le niveau piézométrique du puits de Grenelle a été calculé par M. Mary, suivant la méthode indiquée plus haut, au moyen d'expériences sur le débit à diverses hauteurs.

Ce niveau se trouve à 128^{m},40 au dessus du niveau de la mer.

Puissance des sables verts. — Les sables verts ont un développement de 300 kilomètres, avec une largeur moyenne d'au moins 20 kilomètres.

En admettant qu'ils soient partout également perméables, et qu'ils absorbent 0^{m},25 de hauteur d'eau pluviale par an, ils pourraient alimenter près de 500 puits artésiens donnant un débit de 100 litres à la seconde, analogue au débit du puits de Passy.

Seulement, lorsque ces puits sont voisins et même à quelques kilomètres les uns des autres, ils se nuisent parce qu'ils exercent leur appel d'eau dans la même région de la couche filtrante, qui, semblable au filtre ordinaire de nos fontaines, ne peut donner que la quantité d'eau compatible avec sa surface et sa porosité.

Puits de Passy. — Au puits de Passy, dont la profondeur est de 586^{m},50, on a rencontré l'argile du gault à 523^{m},60 et à 577 les sables de la première nappe dans laquelle débouche le puits artésien de Grenelle; le forage fut poussé plus profondément; à 579^{m},50, on trouva une nouvelle couche d'argile qui fut percée, ce qui permit de rencontrer à 586^{m},50 une seconde couche de sable.

A Passy, l'eau fut rencontrée la première fois à 577^{m},50; mais, après quelques oscillations, elle s'arrêta à quelques mètres au dessous du sol; on avait rencontré la nappe de Grenelle, qui se serait élevée à la même hauteur s'il n'avait pas existé quelque fuite dans le cuvelage.

Jusqu'à la profondeur de 550 mètres, on avait adopté, au puits de Passy, un cuvelage en bois de 0^{m},80 de diamètre intérieur; les douves, soumises à la base à une énorme pression ont dû certainement se disjoindre peu à peu et laisser perdre, dans les assises perméables rencontrées, de grands volumes d'eau; c'est en effet ce qu'indique la décroissance successive remarquée dans le débit.

On allongea le cuvelage en bois par un tube en tôle de 0^{m},70 de diamètre intérieur et de 0^{m},02 d'épaisseur; le tube en tôle fut arrêté dans la dernière couche d'argile; néanmoins, on continua le forage jusqu'à 586^{m},50, où l'on rencontra la nouvelle couche de sable aquifère.

L'eau jaillit le 24 septembre 1861 à midi; le débit, qui atteignit d'abord 289 litres à la seconde, tomba le 28 septembre à 254 litres, le 1er octobre à 232 litres, à la fin d'octobre à 194 litres, et en novembre à 95 litres.

M. Kind, le sondeur allemand qui avait entrepris le puits de Passy, s'était engagé à donner un débit de 14,000 mètres cubes en 24 heures. Il comptait que le débit augmenterait rapidement avec le diamètre, et, prenant comme base le produit du puits de Grenelle, il trouvait qu'un forage de 0^{m},60 de diamètre pourrait donner jusqu'à 60,000 mètres cubes à l'heure. Son engagement lui laissait donc une grande marge.

Il a réussi à donner le volume d'eau qu'il avait promis; mais le succès ne tient pas à la grandeur du diamètre, il tient à ce que le forage a été poussé plus profondément qu'à Grenelle et qu'on est allé chercher une couche plus jaillissante, plus puissante.

Ce qui prouve le bien fondé de l'explication précédente, c'est qu'à Elbœuf M. Mulot a exécuté plusieurs puits artésiens allant jusqu'aux sables verts; il a

rencontré trois nappes jaillissantes ; la première, à laquelle semble correspondre le puits de Grenelle, a toujours été la plus faible.

Puits artésiens de Tours. — Les puits de Tours sont tous forés dans le même terrain ; leur profondeur ne varie que parce qu'ils ont été plus ou moins descendus dans la couche d'argile, grès et sables verts aquifères. Les sables verts supérieurs sont toujours plus ou moins argileux; leur pureté et par suite leur perméabilité, augmente à mesure qu'on descend; on rencontre donc des nappes de plus en plus abondantes.

La couche d'argile, grès et sables verts, a été explorée sur 60 à 80 mètres de hauteur ; les eaux sortent d'un sable coquillier renfermant de nombreux rognons de grès vert et une assez grande quantité de lignite.

Les premières sources se trouvaient quand on avait dépassé les argiles et les grès verts de 5 à 10 mètres ; ces sources, qui n'arrivaient qu'à la surface du sol, donnaient un débit de 2 à 3 litres à la minute ; à 15 ou 20 mètres plus bas, on trouvait des sources jaillissantes donnant 400 à 600 litres à la minute au niveau du sol ; enfin, lorsqu'on s'était engagé de 60 à 80 mètres dans le groupe des terrains, on a obtenu jusqu'à 3,000 litres d'eau à la minute au niveau du sol.

L'eau des puits de Tours est très-convenable pour les usages domestiques ; elle a une légère odeur sulfureuse et abandonne un dépôt rougeâtre ; elle renferme en effet un peu de barégine. Sa température est de 17° à 18°.

A mesure que le nombre des puits a augmenté, la mobilité de la couche aquifère a augmenté, il s'y est formé de nombreuses cavités et on a dû prendre des précautions pour maintenir le tubage.

Les sables verts, qui alimentent les puits de Tours, affleurent, dans le lit de la Loire du côté de Cosne, dans le lit du Cher près de Vierzon, dans les marais de la Brenne, dans les lits de l'Indre, de la Creuse, de la Vienne et de leurs affluents.

A mesure que le nombre des puits a augmenté, le débit de chacun d'eux a diminué.

Le ravinement de la bonne couche aquifère par les puits profonds détermine des éboulements des couches supérieures plus ou moins argileuses ; il en résulte quelquefois une diminution momentanée du débit d'un puits ; une eau boueuse et chargée vient au jour.

A mesure aussi que le nombre des puits forés s'est accru, le niveau piézométrique de chacun d'eux s'est abaissé.

Cela montre la dépendance réciproque de tous ces puits qui s'alimentent à la même nappe. Cette dépendance est vérifiée par d'autres faits :

Un jour, le débit d'un puits augmente de moitié sans cause apparente ; on apprit que le puits voisin venait de s'arrêter, obstrué par le sable ; lorsque celui-ci fut débouché, le premier retrouva son ancien écoulement.

La profondeur des puits artésiens de la ville de Tours varie de 120 à 170 mètres.

Puits de la Butte-aux-Cailles et de la place Hébert, à Paris. — La ville de Paris, après le succès obtenu par le forage de Passy, décida la construction de deux nouveaux puits, l'un vers le Panthéon, l'autre vers la place du Trône.

Comme ils devaient plonger dans la même nappe que le puits de Passy, on chercha à éloigner le plus possible les trois forages et on les plaça aux sommets d'un triangle équilatéral. L'un des nouveaux puits se trouve à la Chapelle, place Hébert, et l'autre à la Butte-aux-Cailles, près de la barrière Fontainebleau. On

s'est décidé depuis à les pousser jusqu'au terrain jurassique, afin de ne point affaiblir les puits de Passy et de Grenelle.

Ce qui caractérise les nouveaux puits, c'est l'adoption des grands diamètres, dont nous avons dit plus haut les avantages.

Sans revenir ici sur les procédés de forage décrits à l'Exécution des travaux, nous nous contenterons de représenter le grand trépan de $0^m,70$ de diamètre dont s'est servi M. Saint-Just Dru :

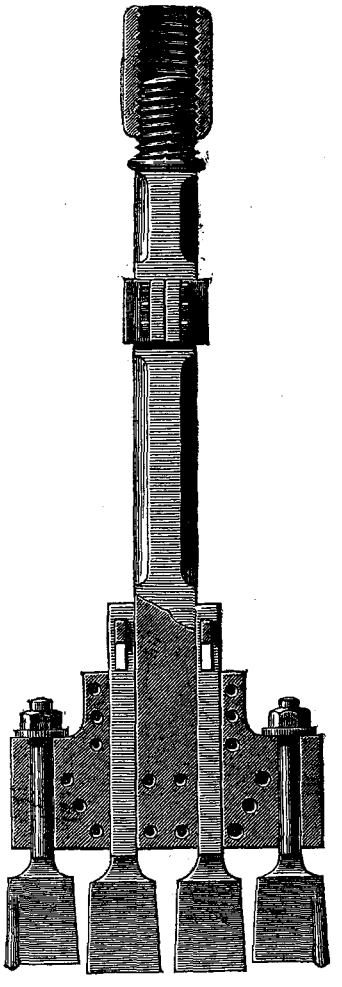

Fig. 29.

Il comprend quatre lames indépendantes, solidement ajustées sur la base de la sonde et faciles à monter comme à démonter : Cet outil, en retombant, agit par percussion sur la roche et la broye ; à chaque coup, le trépan tourne d'un certain angle afin de creuser un trou cylindrique. Les détritus sont enlevés de temps en temps avec une cuiller cylindrique à soupape.

A la Butte-aux-Cailles, on a descendu un grand puits ordinaire à la profondeur de 80 mètres environ, et M. Dru a commencé le forage au diamètre de $1^m,20$.

A la place Hébert, le puits ordinaire n'a pu atteindre que $34^m,40$, et le sondage fut entrepris alors par MM. Degousée et Ch. Laurent au diamètre de $1^m,50$.

On descendit dans le sondage une première colonne de $1^m,58$ de diamètre intérieur et de $1^m,63$ de diamètre extérieur, puis une autre de $1^m,39$ de diamètre intérieur et de $1^m,44$ de diamètre extérieur. Le trépan de MM. Degousée et Laurent est circulaire et pèse 4,800 kilogrammes. Sa forme circulaire assure la régularité du trou, sa position toujours verticale en cas d'accident et, dès lors, quelque facilité pour le retrait, sa tête ne pouvant jamais aller se loger dans les parois. Il attaque le fond en plein au moyen d'une lame transversale qui réunit deux des branches. Dans le cas où on voudrait découper un échantillon du terrain en colonne, il suffit de supprimer la lame transversale et de lui substituer deux des lames ordinaires.

Puits de Rochefort. — MM. Degousée et Laurent ont été chargés en 1861, par le ministre de la marine, de l'exécution d'un forage à l'hôpital de la marine de Rochefort.

On comptait trouver une nappe jaillissante à 200 mètres ; il n'en fut rien, et, sans se décourager, on poussa toujours plus avant jusqu'à $857^m,78$.

A la cote $816^m,30$, on avait rencontré une nappe jaillissante donnant au niveau du sol 150 litres d'eau par minute à la température de 42°.

Les terrains traversés sont :

1° Le terrain crétacé inférieur,
2° Les terrains oolithique et jurassique de $49^m,33$ à $765^m,54$
3° Le terrain triasique de. . . . . $765^m,54$ à $852^m,33$
4° Un calcaire bitumineux de.. . . . . $852^m,33$ à $854^m,48$
5° Un grès très-dur de.. . . . . $854^m,48$ à $857^m,78$.

Trois colonnes de tubes en tôle ont été descendues pour maintenir les terrains éboulants et séparer le courant ascendant des couches perméables qui, malheureusement, ont paru à l'origine absorber une grande partie du débit :

La 1re	colonne de	310	millimètres de	diamètre intérieur va du sol à	49m,33
La 2e	—	260	—	— va jusqu'à	188m,66
La 3e	—	210	—	— —	759m,26.

La partie inférieure a été terminée sans tubage de garantie.

Il a fallu cinq années d'un travail constant pour atteindre l'eau jaillissante à la profondeur de 816m,30.

L'eau jaillissante du puits de Rochefort a un débit de 2 litres à la seconde; sa température est de 40 à 44 degrés; elle contient en dissolution des sulfates et des chlorures qui lui donnent une grande analogie avec les eaux minérales et thermales de Wiesbaden.

Le plus grand inconvénient à surmonter est l'infiltration du courant ascendant à travers les assises perméables des terrains supérieurs. Pour écarter cet inconvénient, les constructeurs ont proposé d'introduire dans le sondage une nouvelle colonne d'ascension, construite de manière à empêcher les eaux de remonter par l'espace annulaire resté libre entre le premier tubage et les parois du forage.

État actuel des travaux de sondage. — Les derniers documents que nous possédions sur les travaux de sondage datent de l'Exposition de 1867.

« Cette exposition, dit M. Ch. Laurent-Degousée, prouve que l'art des sondages ne cesse pas de progresser. Il n'est plus limité comme autrefois à l'emploi des petits diamètres et paraît, au contraire, tout disposé à ne reculer devant aucune des nécessités que peuvent lui imposer les autres branches industrielles. L'instrument, si simple et si modeste il y a seulement vingt-cinq ans, a pris des dimensions qui vont jusqu'à dépasser 4 mètres de diamètre. Rien ne fait supposer que la sonde s'arrête là. Grâce aux progrès de la métallurgie et des arts mécaniques, qui viennent mettre à la disposition du sondeur les éléments qui lui faisaient autrefois défaut, cet art a pu augmenter ses moyens d'action et renoncer à ces dimensions restreintes qui limitaient ses travaux et ses recherches. Aujourd'hui, pour des sondages très-ordinaires, l'instrument de sondage ne descend guère au-dessous de 0m,16, n'admettant pas moins de 0m,10 pour la pose des colonnes d'ascension, lorsqu'il s'agit de recherches d'eau pour les besoins particuliers.

« Les chiffres inférieurs résultent de circonstances fâcheuses et imprévues, et dénotent plus souvent l'indigence des moyens employés qu'une volonté admise en principe d'arriver à d'aussi faibles limites. Un sondeur expérimenté s'arrangera toujours de manière à maintenir des dimensions qui lui offriront des ressources suffisantes pour donner à ses outils le poids et la force convenables. C'est ainsi qu'il assure la certitude du résultat à obtenir et la facilité de réparer promptement les accidents. Ces précautions constituent à elles seules une des causes principales des succès constants obtenus par les bons sondeurs. On aurait quelque peine à trouver aujourd'hui un sondage abandonné soit par suite d'accidents réputés autrefois irréparables, soit par suite de dimensions trop réduites pour atteindre la profondeur indiquée. »

CHAPITRE IV

DISTRIBUTIONS D'EAU PAR DÉRIVATION

On trouve la description des principales distributions d'eau dans des monographies détaillées, que nous ne saurions reproduire ici et qui ne sont intéressantes à consulter que pour le spécialiste. Nous nous contenterons d'indiquer les dispositions générales de quelques distributions d'eau choisies parmi les plus connues.

1° EAUX DE ROME [1]

« Si l'on considère, dit Pline, la quantité incroyable d'eaux qu'on avait fait venir à Rome pour l'usage du public, pour les fontaines, les bains, les viviers, les maisons particulières, les jardins, les maisons de campagne; si l'on se représente des arcades construites à grands frais et conduites pendant un très-long espace de chemin, des montagnes coupées, des roches percées, des vallées profondes comblées, on avouera qu'il ne s'est rien vu de plus merveilleux dans tout l'univers. »

Voici les dates et la longueur des principales dérivations :

1° En l'an 442 de Rome, dérivation de la source Appia. — Longueur 26,000 mètres, presque tout entière en souterrains; 40 mètres seulement étaient en arcades;

2° En l'an 484, dérivation du fleuve Anio, affluent du Tibre. La longueur de cet aqueduc de l'Anio-Vieux était de 63,800 mètres, dont 330 mètres seulement en superstructure;

3° En l'an 608 de Rome, construction par le préteur Marcius de l'aqueduc qui porte le nom d'eau Marcia et qui amène au Capitole des eaux de sources très-pures, prises sur la rive droite de l'Anio, à une distance de 91,600 mètres; l'aqueduc se trouvait en substruction sur 750 mètres et en arcades sur 10,500 mètres aux environs de Rome;

[1] M. Rozat de Mandres, inspecteur général des ponts et chaussées, a donné une description des eaux de Rome, à la fin du premier siècle de notre ère. C'est à cette description que nous empruntons nos renseignements, qui sont extraits du reste d'un mémoire de Sextus Julius Frontinus, surintendant des eaux de Rome, *Mémoire* traduit en 1820 par Rondelet.

4° En l'an 627 de Rome, on dérive les sources de la Tépula et de la Julia; la longueur de l'aqueduc est de 23,000 mètres, dont plus de 9,000 mètres en arcades. L'aqueduc de la Tépula est superposé aux arcades de l'aqueduc Marcia, et l'eau de la Julia coule sur le même aqueduc au-dessus de l'eau de la Tépula;

5° En 732, on construit l'aqueduc de l'eau vierge, eau de source excellente maintenue à sa naissance dans une enceinte de maçonnerie de briques et ciment. La longueur de l'aqueduc est de 23,000 mètres, dont environ 1,050 mètres en arcades;

6° Vers la même époque, on dérive les eaux du lac Alsietinus, eaux peu salubres, destinées à la naumachie d'Auguste et à l'usage des jardins. Longueur de cette dérivation, 33,000 mètres.

7° Auguste renforça l'eau Appia par un ruisseau dérivé en souterrain sur 4 kilomètres, et l'eau Marcia par une source de la rive droite de l'Anio, dérivée au moyen d'un aqueduc de 500 mètres de long; cette source portait le nom d'eau Augusta;

8° Caligula, et Claude après lui, amenèrent à Rome, pour les besoins d'un luxe sans cesse croissant, l'eau Claudia et une seconde dérivation de l'Anio. Cette dérivation, faite sur le cours supérieur, amène l'eau sur toutes les collines au moyen d'aqueducs dont les arcades atteignent 33 mètres de hauteur, et qui a près de 69 kilomètres de long. Les eaux, souvent troubles, s'épuraient dans des piscines disposées sur le cours de l'aqueduc.

Les aqueducs romains étaient en maçonnerie ; leur section, d'abord rectangulaire, fut ensuite profilée en plein cintre.

L'ouverture des voûtes, des arcades, variait de 5 à 8 mètres.

L'aqueduc Claudia avait, aux abords de Rome, dans la partie en arcades, une pente de $0^m,0015$ par mètre, et depuis l'origine des arcades jusqu'à la source une pente de $0^m,0023$.

La pente de l'aqueduc de l'eau Marcia était aussi d'environ $0^m,002$.

Les anciens aqueducs possédaient uue pente plus forte; Vitruve parle de $0^m,005$.

L'approvisionuement total de la Rome Impériale s'élevait à 1,500,000 mètres cubes d'eau par jour, pour un nombre d'habitants qu'on peut évaluer à un million. C'est 1,500 litres par jour et par tête; nous sommes encore bien loin de cette profusion!

Eaux de Rome moderne. — Rome n'était plus alimentée vers 1860 que par trois aqueducs: l'eau Vergine, l'eau Felice et l'eau Paola.

L'eau Vergine (ancienne eau Vierge) et l'eau Felice proviennent de sources; l'eau Paola est alimentée à la fois par des sources et par le lac Bracciano.

Le volume total, versé chaque jour dans Rome, est de 180,000 mètres cubes; c'est encore une proportion considérable par tête d'habitant, puisque la population de Rome n'était, en 1858, que de 170,000 habitants.

L'eau Vergine est la seule potable; l'eau Felice est chargée de calcaire, et l'eau Paola de limon et de substances organiques,

2° DISTRIBUTION D'EAU D'AVALLON

La distribution d'eau d'Avallon a été projetée et exécutée en 1847 par M. l'ingénieur Belgrand, aujourd'hui directeur des eaux de Paris, qui, depuis, a réalisé les dérivations colossales de la Dhuis et de la Vanne.

M. Belgrand a rendu compte de son travail dans une notice insérée aux annales des ponts et chaussées de 1850, notice à laquelle nous emprunterons les renseignements suivants.

Les figures 1 et 2 de la planche 2 donnent le plan et le profil en long de la distribution qui se compose :

« 1° D'une conduite libre en béton de ciment de Vassy, de 3629 mètres de longueur établie entre les sources de l'étang Minard, dans la vallée d'Aillon, et la pointe du contrefort des Alleux qui domine le Cousin en face de la ville ;

2° De vingt et un regards établis sur cette conduite ;

3° D'un réservoir de forme cylindrique ayant 16 mètres de diamètre intérieur, 2 mètres de profondeur, recouvert d'une voûte en calotte sphérique de $2^m,14$ de flèche, formée de trois rangs de briques simples posées à plat, à bain de mortier de ciment ;

4° D'une conduite forcée de 1270 mètres de longueur, en tuyaux de fonte de $0^m,162$ de diamètre intérieur, destinée à franchir le ravin de 88 mètres de profondeur, au fond duquel roule le Cousin, et à établir une communication entre le réservoir et la ville ;

5° D'un pont aqueduc sur le Cousin, d'une seule arche de 30 mètres d'ouverture et de 3 mètres de flèche, construite en maçonnerie brute avec mortier de ciment de Vassy. »

La conduite libre, partant de A, suit le lit de l'ancien ruisseau pour recueilli une multitude de petites sources jusqu'en B; en C elle en recueille de nouvelles.

Entre A et C, sur 357 mètres, la pente de la conduite suit celle de la prairie, 1 à 8 millimètres par mètre.

De C en F jusqu'au réservoir des Alleux, sur 3272 mètres, la conduite se développe à flanc de coteau sur les terrains granitiques avec une pente uniforme de 1 centimètre pour 30 mètres, ou d'un tiers de millimètre par mètre.

Sauf aux points D et E, où l'on a dû exécuter l'aqueduc dans des tranchées de quelques mètres de profondeur, afin d'éviter un long détour, cet aqueduc se trouve dans une fouille descendant à $1^m,50$ au dessous du sol.

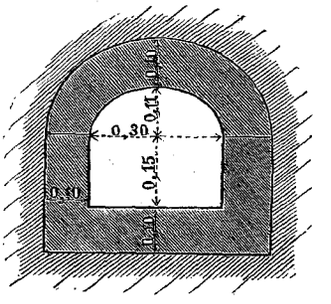

Fig. 30.

Le profil de l'aqueduc est celui de la figure 30 : cuvette de $0^m,30$ sur $0^m,15$ recouverte d'une anse de panier de $0^m,30$ sur $0^m,11$; épaisseur uniforme de la maçonnerie, $0^m,10$. Il en résulte un cube de $0^m,136$ par mètre courant, porté à $0^m,1375$ afin de donner aux pieds droits un léger fruit destiné à faciliter le moulage.

Cet aqueduc a coûté 7 francs le mètre courant; une galerie voûtée, capable de livrer passage à un homme, ce qui est une condition nécessaire pour les répara-

tions, eût coûté 38 francs le mètre. Avec l'aqueduc en ciment, lorsqu'une avarie locale survient, on enlève le tronçon détérioré et on le remplace par une pièce moulée toute neuve.

Le tableau suivant donne le débit de l'aqueduc pour des hauteurs d'eau de 5,10 et 15 centimètres; ce débit a été calculé par la formule de M. Bazin $RI=Au^2$, dans laquelle on a donné à A les valeurs qui conviennent aux parois unies :

HAUT. D'EAU DANS LA CUVETTE	SECTION D'ÉCOULEMENT	PÉRIMÈTRE MOUILLÉ	RAYON MOYEN	COEFFICIENT A	VITESSE MOYENNE u	DÉBIT A LA SECONDE (litres)	DÉBIT PAR 24 HEUR. (mètres)
mètre	mq.	mètre			mètre		mc.
0,05	0,015	0,4	0,0375	0,000549	0,15	2,25	194
0,10	0,030	0,5	0,06	0,000412	0,223	6,69	578
0,15	0,044	0,6	0,075	0,000358	0,265	11,925	1,030

Les regards, espacés de 150 mètres, sont des cylindres verticaux de $0^m,80$ de diamètre, recouverts d'une dalle qui fait saillie de $0^m,05$ sur le sol; à l'aplomb du regard, le fond de l'aqueduc est établi à $0^m,10$ en contrebas des parties voisines; c'est dans la cavité ainsi formée que s'amassent les sables et les terres qui sont entraînés par le courant et qu'on enlève de temps en temps.

Le réservoir cylindrique des Alleux a une capacité de 400 mètres cubes; l'épaisseur du radier est de $0^m,50$ et celle des murs d'enceinte est de 2 mètres, avec seize contre-forts de $1^m,50$ de large et de 1 mètre d'épaisseur. La voûte en trois rangs de briques à plat a une épaisseur de $0^m,14$ avec sa chape de $0^m,03$; elle est recouverte d'une couche de terre de $0^m,50$ et porte ainsi 900 à 1000 kilogrammes par mètre carré.

Les murs et le radier du réservoir sont recouverts d'une chape en mortier de ciment de $0^m,03$ d'épaisseur.

La conduite forcée part du fond du réservoir; lorsque celui-ci est plein jusqu'à son déversoir, la charge sur le point le plus bas de la conduite est $88^m,80$, et la charge disponible entre le réservoir et le point où la conduite débouche, pavé de la tour d'Horloge, est de $7^m,00$ pour une longueur de tuyau de 1270 mètres.

Calculons le débit de cette conduite forcée, en nous servant de la formule de Darcy.

$$Ri = b_1 u^2;$$

Le rayon R est égal à. . . . . $0^m,081$

La perte de chaque i par mètre courant est égale à . . $\frac{7}{1270}$.

le coefficient b_1 est égal à 0,00586 pour les tuyaux neufs et à deux fois ce nombre pour des tuyaux en service depuis quelque temps.

Ces nombres nous donnent;

$$u^2 = 0,38 \qquad u = 0,616$$

et, comme la section est de $0^{mq},0206$, le débit de la conduite atteint le chiffre de $12^{lit},69$ à la seconde.

On voit donc que la conduite forcée débitera facilement le volume qu'amène au réservoir l'aqueduc coulant à pleine cuvette.

Les tuyaux sont en fonte, à cordon et emboîtement ; leur épaisseur a été proportionnée à la charge maxima qu'ils devront supporter, et calculée par la formule connue.

L'aqueduc est, avons-nous dit, en béton de ciment de Vassy; on moule séparément la cuvette et la voûte qui la recouvre; les morceaux de la cuvette avaient $0^m,50$ de long et ceux de la voûte $0^m,25$.

Chaque mètre cube de béton a employé, pour le moulage seulement :

$1^j,16$ de maçon,
$2^j,36$ de gâcheur,
$0^j,25$ de manœuvre,
392 kilogrammes de ciment de Vassy.
$0^{mc},445$ de sable.
$0^{mc},645$ de pierrailles.

Il va sans dire que les morceaux successifs étaient soudés entre eux au moyen d'un bon mortier de ciment.

Pour le captage des sources, la cuvette de l'aqueduc a été posée à morceaux jointifs comme dans le travail courant; mais on a laissé entre les morceaux successifs de la petite voûte des joints libres de $0^m,10$, par où les eaux tombent dans la cuvette qui ne les abandonne plus. La conduite est entourée d'une pierrée recouverte de mousse, afin que les eaux seules puissent passer sans entraîner les terres et les détritus.

La dépense totale s'est élevée à 97598 fr. 18 c.
qui se décompose comme il suit :

Conduite libre de 3630 mètres de longueur.	$33,223^f,96$
Réservoir.	$11,463^f,12$
Pont aqueduc.	$9,189^f,28$
Conduite forcée de 1270 mètres.	$35,601^f,11$
Dépenses en régie pour épuisements et terrassements dans l'eau	$6,835^f,41$
Frais de surveillance.	$1,000^f,00$
Total égal.	$97,598^f,18$

Il faut bien remarquer que dans cette dépense n'entrent pas les frais de distribution dans la ville même.

3° DISTRIBUTION D'EAU DE DIJON.

La distribution d'eau de Dijon a été établie par Darcy, inspecteur général des ponts et chaussées, qui en a consigné les détails dans une œuvre fort intéressante et très-remarquable, à laquelle nous avons pu faire de larges emprunts, car elle ne sera pas rééditée.

Historique des eaux de Dijon. — D'après Grégoire de Tours, Dijon était, vers la fin du sixième siècle, une place forte au sud de laquelle coulait la rivière d'Ouche, tandis que du nord descendait la rivière de Suzon, dont les eaux parcouraient les fossés des remparts.

Du septième siècle au dix-septième siècle, les eaux de diverses fontaines de Dijon furent amenées dans la ville, entre autres les sources de la Ribottée et des Lochères qui, conduites dans un aqueduc en bois de 596 toises, étaient reçues dans une auge en pierre surmontée d'un lion en pierre (1445).

En 1534, furent détruites les fontaines de Champ-Damas et de la tour Saint-Nicolas, créées 89 ans auparavant.

Dans la même année 1534, on amena sur la place de Saint-Michel la fontaine de Champ-Maillot ; mais, en 1556, la conduite ne fonctionnait déjà plus. Elle fut rétablie, puis supprimée en 1636, à cause de l'infection que dégageaient les eaux croupissantes du bassin Saint-Michel.

En 1619, un fontainier s'engagea à conduire sur la place de la Sainte-Chapelle, moyennant une somme de 2700 livres, une source située près de Montmusard ; la fontaine de la Sainte-Chapelle fut détruite 20 ans après, en 1640.

Les eaux de ces fontaines étaient peu abondantes et variaient de 15 à 30 litre par minute.

Le cours de Suzon, qui arrosait les remparts de la ville, n'a jamais été bien régulier et a éprouvé fréquemment des diminutions énormes ; en 1418, le conseil de ville délibère : « Qu'on fasse rompre une grosse pierre étant au cours de Suzon, afin que, par ce moyen, l'eau du dit Suzon vienne plus souvent à Dijon qu'elle ne faict. » Des règlements fréquents interdirent de jeter dans le cours de Suzon tous gravats et immondices.

En 1561, sur une ordonnance du vicomte Maïeur et des échevins, le cours de Suzon fut visité pour y rechercher les sources que l'on pourrait y amener ; les experts remarquèrent surtout, près de Messigny, une belle et grosse fontaine, appelée fontaine du Rosay ou du Rosoir, dont ils dirent : « et sont les sources d'icelle, la plupart bouchées de sable, argile, et encombrées de limons de terre qui empêchent fort la dite fontaine de jeter et effluer son eau. »

De ce moment germa l'idée de conduire à Dijon le produit de la fontaine du Rosoir, mais on voulait toujours emprunter le lit de Suzon, lit perméable où l'eau se perdait bien vite ; il eût fallu établir une cuvette maçonnée, et l'on reculait devant la dépense de construction et d'entretien.

Bien des projets furent présentés ; le plus sérieux est celui d'un sieur Chapus, qui vers 1670 proposa d'amener les eaux de la fontaine du Rosoir en les enfermant dans un aqueduc maçonné.

Au dix-neuvième siècle, Dijon se trouvait toujours dans une déplorable situation au point de vue des eaux potables ; les habitants avaient exclusivement recours à des puits particuliers et à une centaine de puits placés sur les voies publiques ; ces derniers n'étaient même pas couverts et il n'était pas rare que le seau qui ramenait l'eau destinée aux usages domestiques renfermât un animal noyé depuis plusieurs jours.

Darcy se posa le problème d'amener à Dijon 150 litres d'eau par habitant et par jour, soit 4500 mètres cubes en tout par vingt-quatre heures.

Il montra d'abord que, si l'on prenait cette eau dans la rivière d'Ouche et qu'on l'élevât par machines, il faudrait dépenser 100,000 francs comme capital de construction, et au moins 30,000 francs par an en frais d'exploitation. Par ce procédé, on obtiendrait des eaux impotables en temps de crue, d'un goût marécageux en temps de sécheresse, et d'une température tellement élevée en été qu'on ne pourrait les boire sans les faire rafraîchir.

Il fallait donc écarter les machines élévatoires et recourir à la dérivation de

la source du Rosoir, dérivation qui ne coûtait que 360,000 francs et donnait une eau toujours pure et limpide.

Source du Rosoir, température de l'eau des conduites. — La source du Rosoir sort, à flanc de côteau, du calcaire à entroques compris entre la terre à foulon et les marnes du Lias; la terre à foulon est surmontée de la grande oolithe.

La source de Jouvence, voisine de celle du Rosoir, sort de la terre à foulon.

La température moyenne de la source du Rosoir est de 10°,37; par une journée de juin 1849 excessivement chaude, la température était de 10°,6.

On a cherché ce que devenait cette température dans le réservoir et aux différentes voies d'écoulement, et on a trouvé les résultats suivants :

ANNÉE 1847	23 JUIN	10 JUILLET	24 JUILLET	10 AOUT	30 NOVEMB.	18 DÉCEMB.	24 JANVIER 1848
Température moyenne de l'air. .	16°	21°	21°	17°	5°	1°7	—3°
Température moyenne du réservoir de la porte Guillaume.	11°	11°5	12°	12°	11°	10°8	9°4
Température moyenne des bornes-fontaines.	12°3	12°7	13°2	13°5	10°6	9°9	8°6

Constance de température dans les distributions d'eaux de source. — Les résultats expérimentaux montrent que la température des eaux distribuées est sensiblement constante. On a donc des eaux fraîches en été et chaudes en hiver.

C'est un immense avantage en faveur des distributions d'eaux de sources; jamais on n'obtiendra rien de pareil avec les eaux de rivière élevées par machines.

Depuis 1856, M. Belgrand poursuit sur la température des eaux de Paris des expériences régulières, il a trouvé que :

« 1° Les eaux de rivière, distribuées à Paris, se refroidissent un peu en été et se réchauffent un peu en hiver, dans le parcours des conduites. La plus grande variation constatée, correspondant à une température extraordinaire de 28°, a été de 3°,60.

« 2° Les plus grandes variations de l'eau de la Dhuis, qui parcourt un aqueduc de 130 kilomètres, sont de 2° en été et de 1° en hiver. »

L'argument de la constance de la température est donc capital en faveur des distributions d'eaux de sources.

Ce point était important à établir, parce qu'on l'a quelquefois méconnu lorsqu'on a opposé les distributions par machines élévatoires aux distributions par dérivation.

Analyse et débit de la source du Rosoir. — L'eau de la source du Rosoir est très-salubre ainsi que le montre l'analyse suivante faite sur 10 litres d'eau :

Silice.	152 millig.	Report. . .	2502 —
Alumine.	10 —	Chlorure de sodium.	7 —
Carbonate de magnésie. . . .	21 —	Sulfate de soude.	27 —
Carbonate de Chaux.	2300 —	Carbonate de soude.	44 —
Chlorure de magnésium. . .	19 —	Nitrate de potasse.	27 —
A reporter. .	2502 —	Total. . .	2607 —

C'est donc 0gr,26 de résidu solide par litre d'eau.

Le débit de la source du Rosoir, constaté par déversoirs, est donné par le tableau suivant :

En 1832,	débit	minimum	le 30	septembre. .	2770 litres à la minute.
En 1833	—	—	5	—	3107 —
En 1842	—	—	9	—	3975 —
En 1843	—	—	11	—	3926 —
En 1845	—	—	3	octobre.. . .	4635 —
En 1846	—	—	29	septembre. .	3769 —

Ainsi, le débit minimum a toujours lieu vers l'automne, c'est-à-dire à la fin de la saison chaude ; c'est ce qui se produit pour toutes les sources, ainsi que nous l'avons déjà dit.

Le débit diminue dans les périodes sèches et augmente dans les périodes humides.

En 1832, on était entré depuis quelques années dans une période humide, qui a duré jusqu'en 1856 ; aussi voit-on le débit de la source du Rosoir monter de 2,700 litres à 4,600 litres.

Il est probable que, depuis 1856, ce débit a diminué dans de notables proportions. Il reprendra sa valeur ancienne après une succession d'hivers humides.

L'augmentation de 2,700 à 4,600 litres dans le débit de la source du Rosoir, constatée de 1832 à 1845, tient aussi à ce que l'orifice d'épanchement de la source a été dégagé et abaissé de $1^{m},10$.

Augmentation du débit par l'abaissement de l'orifice de la source. — L'abaissement de l'orifice d'une source produit le même effet que le raccourcissement du tube d'un puits artésien : la charge disponible augmente et, avec elle, le débit.

Ce résultat est facile à vérifier par une expérience directe faite le même jour sur la même source.

Tracé et profil en long de l'aqueduc du Rosoir. — Le profil en long de l'aqueduc du Rosoir est donné tout entier sur la planche 3.

La longueur de l'aqueduc est de $12694^{m},80$; la fontaine du Rosoir est sur la rive droite de Suzon, qui est très-escarpée, aussi l'aqueduc passe-t-il immédiatement sur la rive gauche au moyen d'un petit tunnel établi sous le cours de Suzon. Il passe ensuite trois fois de la rive gauche à la rive droite et inversement, et débouche enfin dans le réservoir de la porte Guillaume, après avoir parcouru une longue série d'arcades.

Le développement total comprend :

43 alignements droits.	$12,216^{m},302$
42 courbes..	$478^{m},498$
Total. . . .	$12,694^{m},800$

Tous les rayons des circonférences de raccordement sont de 20 mètres.

Les pentes successives, ainsi que les chutes aux extrémités des pentes, sont inscrites sur le profil en long, et il paraît inutile de les reproduire ici.

L'abaissement total produit par les pentes est de.. .	$46^{m},758$
— — les chutes..	$6^{m},550$
D'où résulte une chute totale de. .	$53^{m},308$

Profils en travers de l'aqueduc. — Les profils en travers de l'aqueduc du Rosoir sont représentés par la planche 4.

Le type courant, figure 4, a une largeur de $0^m,60$ et une hauteur sous clef de $0^m,90$; il est terminé en plein cintre et recouvert d'un enduit de $0^m,03$.

Il règne sur $11,682^m,25$.

Sur les ponts aqueducs on a adopté une section rectangulaire; au passage de diverses routes, on a réduit la hauteur à $0^m,75$. Au passage sous le lit du Suzon, on a, au contraire, augmenté la hauteur afin de permettre la visite facile de l'aqueduc.

Les figures 5, 6, 7, représentent plusieurs de ces profils exceptionnels.

« J'avais d'abord, dit Darcy, pensé que, pour raison d'économie, on pouvait se borner à adopter une section présentant une largeur moyenne de $0^m,47$ sur la hauteur de $0^m,50$. Cette section aurait été suffisante pour le débit du volume nécessaire à l'alimentation de la ville de Dijon ; mais, dans une conduite de cette étendue, il est nécessaire de se ménager des moyens faciles de vérification ; or, la section précitée n'aurait pas permis à un homme de s'introduire dans l'aqueduc. Cette observation a été approuvée par le conseil municipal de Dijon, qui n'a pas craint de voter le supplément de dépense nécessaire à l'obtention d'une section plus considérable.

L'épaisseur des maçonneries a du reste été calculée de manière à obtenir un cube aussi faible que possible, sans nuire à la solidité.

L'épaisseur du radier, $0^m,30$, a été augmentée sur une petite longueur à l'aval des grandes chutes verticales qui suivent les ponts aqueducs.

L'enduit en ciment ne règne que sur le radier et les piédroits jusqu'à la hauteur maxima que l'eau doit atteindre ; ainsi, la hauteur de l'enduit a été de $0^m,30$ pour toutes les pentes au-dessus d'un millimètre, $0^m,50$ ou de toute la hauteur des parois verticales du conduit rectangulaire qui précède les trois viaducs de Suzon, $0^m,40$ dans la partie de l'aqueduc où la pente n'est que de $0^m,00086$. Cet enduit était arrondi aux angles suivant un congé de $0^m,04$; il avait pour effet de réduire à $0^m,54$ la largeur de la cuvette.

Bâtiment recouvrant la source. — Avant de construire l'enceinte en maçonnerie qui environne la source, on a déblayé son bassin de $1^m,50$ à 2 mètres, de manière à mettre à nu les rochers qui le bordent et à apprécier aussi exactement que possible les points d'où surgissent les eaux.

On arrive aisément à cette dernière connaissance en répandant de la fleur de son à la surface de la nappe fluide. En effet, si elle est repoussée dans tous les sens, suivant des cercles concentriques, on conclut que le point de jaillissement correspond au centre de ces cercles, lequel reprend le premier sa transparence. Si, au contraire, la poussière suit une direction rectiligne, on peut également en conclure la direction du courant horizontal suivant lequel sont amenées les eaux, (fig. 3 à 6, pl. 5).

Après s'être ainsi assuré des points précis d'où jaillissaient les sources, on a fait tracer les fondations de telle sorte que les maçonneries ne puissent altérer le débit.

La voûte qui recouvre les sources a dans œuvre la largeur de $5^m,20$ et la longueur de $11^m,10$; elle se termine du côté de la montagne par une niche de $2^m,60$ de rayon.

Prises d'eau supplémentaires. — Planche 4, figures 8, 9, 10. On a établi en trois points des prises d'eau supplémentaires, destinées à recueillir des sources secondaires.

L'aqueduc porte latéralement deux chambres de $0^m,30$ de profondeur sur $0^m,50$ de large, séparées de la cuvette de l'aqueduc par une dalle verticale de $0^m,40$ de hauteur, c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à celle de la tranche d'eau qui coule dans l'aqueduc. Les deux chambres communiquent avec le derrière des culées de l'aqueduc par un orifice rectangulaire aplati de $0^m,20$ sur $0^m,10$; l'extrémité de cet orifice est entourée d'une pierrée, que traversent les eaux de source, qui gagnent ainsi les chambres où elles s'élèvent et d'où elles tombent dans l'aqueduc en passant sur la dalle verticale qui forme déversoir.

Une rainure verticale ménagée dans les parois de la chambre permet d'interrompre la communication entre l'aqueduc et la source, et de ne pas admettre les eaux de celle-ci lorsqu'elles deviennent accidentellement impropres à l'alimentation.

On remarquera que les eaux de la source sont forcées de surmonter la dalle verticale qui sépare la chambre et l'aqueduc; elles perdent donc de leur charge et par suite de leur débit. On pourrait éviter cet inconvénient au moyen de siphons plongeant d'un côté dans la chambre, de l'autre côté dans l'aqueduc, siphons qui fonctionneraient d'une manière intermittente.

Regards de service. — Les figures 1 à 3 de la planche 4 représentent les regards de service placés d'abord à toutes les chutes et puis dans des positions intermédiaires de telle sorte que leur distance moyenne fût de 100 mètres au plus.

Plusieurs de ces regards sont couverts d'un pavillon : cette disposition est évidemment la plus commode; mais elle impose une assez forte dépense, et, en général, les regards sont fermés par une dalle recouverte de terre comme le reste de l'aqueduc.

Des bornes méplates, terminées par un demi-cylindre à la partie supérieure, indiquent les regards sur les chutes. Ces bornes servent en même temps à déterminer d'une manière précise le tracé de l'aqueduc.

En établissant des chutes de place en place, Darcy n'a pas eu l'intention de diminuer la pente, comme on pourrait le croire au premier abord; il n'a pas attaché d'importance à la régularité de la pente de l'aqueduc qui varie, comme nous l'avons vu, dans des limites assez étendues. Son but a été, en réservant ces chutes qui atteignent $0^m,50$ à 1 mètre : 1° de baisser assez le radier pour que son extrados restât toujours à 1 mètre au-dessous du sol dans les points où le relief change brusquement; 2° de disposer, à des intervalles assez rapprochés, des moyens de placer d'une manière commode des appareils de jauge qui ne fussent pas noyés par l'eau d'aval.

Malgré la faible épaisseur des parois de l'aqueduc, on n'a jamais reconnu de différence entre les jaugeages exécutés à son origine et à son extrémité.

Ponts aqueducs sur le Suzon. — Trois ponts aqueducs ont été établis sur le Suzon : ils sont à trois arches de $3^m,25$ avec deux piles de $1^m,10$ à la base, et de $0^m,90$ au sommet.

Chaque arche est franchie au moyen d'une auge en pierre de $0^m,60$ de hauteur et de $0^m,85$ de largeur à l'extérieur, livrant à l'intérieur un passage de $0^m,40$ sur $0^m,45$; les auges successives se terminent et se soudent à l'aplomb des piles; elles sont recouvertes par des dalles de longueur irrégulière, de $0^m,20$ d'épaisseur, faisant saillie latéralement de $0^m,05$.

Pont aqueduc près la porte Guillaume. — Figures 1, 2, 2 *bis*, planche 5. Entre les deux pavillons de ses extrémités, cet aqueduc a une longueur de

148 mètres; il comprend 59 arcades en plein cintre de 2 mètres de diamètre, cinquante-huit piles de 0m,50 d'épaisseur et 2 culées de 1 mètre.

L'épaisseur à la clef des voûtes est de 0m,30. Sur la plinthe de 0m,20 reposent les deux murs latéraux de la cuvette et le radier est au niveau de la plinthe; les deux murs latéraux sont surmontés d'une dalle, taillée à deux égouts, formant la toiture de l'aqueduc.

Le viaduc a été complétement exécuté en moellon smillé et les enduits n'ont été appliqués qu'après l'achèvement et le recouvrement de la cuvette.

Dépenses de l'aqueduc. — Les dépenses de l'aqueduc du Rosoir se sont élevées à 256,916 fr. 26 cent., savoir :

Terrassements	46,824f,81
Maçonnerie	162,320f,56
Chape	14,113f,93
Enduits	19,399f,07
Béton	2,961f,45
Regards	1,811f,30
Bornes	952f,53
Cintrements	3,005f,54
Ouvrages accessoires	5,527f,07
Total égal	256,916f,26

Le prix de revient par mètre courant d'aqueduc s'est élevé à 20 fr. 87 cent.

Il faut ajouter au total précédent :

Les ouvrages exécutés pour la prise d'eau et le tunnel sous le lit du Suzon.	12,266f,41
Les trois ponts aqueducs	13,135f,20
L'aqueduc de la porte Guillaume	26,264f,15
Les sept pavillons recouvrant les regards	8,400f,00
Total	60,065f,76
Montant général des travaux	316,982f,02

soit, en nombre rond, 25 francs par mètre courant de la dérivation.

Distribution intérieure. — Les travaux de distribution intérieure comprennent :

1° Deux réservoirs, placés l'un en tête, l'autre à l'extrémité de la conduite ou artère principale;

2° Un système de tuyaux en fonte de différents diamètres qui, se ramifiant dans tous les quartiers de la ville et des faubourgs, viennent alimenter les bornes-fontaines.

Quelques-unes de ces conduites sont placées dans des galeries en maçonnerie; d'autres sont simplement placées dans des tranchées remblayées après leur pose. Les unes et les autres sont interrompues par des cuves de distribution sur lesquelles viennent se brancher plusieurs conduites, par des robinets destinés à intercepter, lorsqu'il y a lieu, l'écoulement des eaux ou à vider les conduites. Sur quelques unes d'entre elles, enfin, il y a eu nécessité de fixer des ventouses pour donner issue à l'air, dont la présence altérait le débit des tuyaux.

Ce système de tuyaux est susceptible d'une classification méthodique.

On distingue, en premier lieu, l'artère principale en communication directe avec les réservoirs, et qui peut être considérée comme leur prolongement. Sur

cette artère viennent se brancher, à droite et à gauche, une série de tuyaux, appelés répartiteurs parce que leur fonction est de porter, dans les différents quartiers d'une ville, les eaux renfermées dans l'artère principale et transmises par les réservoirs. Enfin, ces tuyaux répartiteurs qui, de même que la conduite principale, peuvent alimenter directement un certain nombre de bornes-fontaines placées dans les rues qu'ils parcourent, envoient leurs eaux dans les rues perpendiculaires à leur direction, au moyen de branchements secondaires, desquels partent les tuyaux de service proprement dits, c'est-à-dire ceux dont l'extrémité aboutit aux fontaines, bornes-fontaines ou qui desservent les concessions particulières.

Réservoir de la porte Guillaume. — Planche 6. C'est un réservoir circulaire de $28^m,10$ de diamètre dans œuvre à la naissance des voûtes: un puits, d'un diamètre intérieur de $2^m,50$, en occupe le centre ; le mur d'enceinte de ce puits, qui supporte un édicule extérieur très-élégant, a 2 mètres d'épaisseur. L'intervalle de $10^m,80$ entre la paroi extérieure dudit puits et la paroi intérieure du réservoir, est recouvert par deux voûtes annulaires reposant sur un piédroit dont l'épaisseur est de $0^m,80$ à la naissance de ces voûtes ; le diamètre de ces voûtes en plein cintre est donc de 5 mètres.

Le mur d'enceinte du réservoir a une épaisseur de 3 mètres à sa base, et le mur circulaire de refend ou piédroit des deux voûtes aunulaires, a une épaisseur de $1^m,20$ à sa base.

L'épaisseur des voûtes à la clef est de $0^m,40$.

La hauteur totale du réservoir est de 5 mètres.

Le radier a des pentes qui convergent vers le puits central dont le plafond est en contrebas de $0^m,20$, afin de permettre l'assèchement complet du réservoir.

Le trop plein du réservoir est conduit par un tuyau spécial dans le Jardin botanique de la ville.

Toutes les maçonneries du réservoir ont été faites en moellon brut à l'exception des voûtes, du mur de refend intermédiaire et du parement intérieur du puits central, lesquels ont été exécutés en moellon smillé.

L'épaisseur du radier, variable suivant la nature du terrain rencontré, est d'au moins $0^m,50$.

Toutes les parois intérieures sont recouvertes d'un enduit en chaux hydraulique de $0^m,04$ d'épaisseur et la chape sur les voûtes a $0^m,10$ d'épaisseur.

Le puits central du réservoir renferme tous les tuyaux et robinets de distribution qui permettent :

1° D'interrompre toute communication entre l'aqueduc, le réservoir et la conduite principale ;

2° D'interrompre toute communication entre l'aqueduc et le réservoir, tout en laissant l'aqueduc en communication avec la conduite principale ;

3° D'interrompre la communication de l'aqueduc et du réservoir en laissant celui-ci en communication avec l'artère principale ;

4° D'alimenter la ville à la fois avec le réservoir et la conduite.

La capacité du réservoir est de 2313 mètres cubes.

On a eu soin de ménager, au sommet de la voûte annulaire à l'extérieur, une issue pour l'air confiné qui, sans cela, s'y comprimerait et rendrait inutile une partie de la capacité.

Réservoir de Montmusard. — Le réservoir de Montmusard se trouve à l'extrémité de la conduite principale, fig. 2, planche 6.

La nécessité du réservoir de la porte Guillaume est évidente : il est destiné à

parer aux inconvénients des chômages que peuvent entraîner les réparations de l'aqueduc et de ses accessoires. A raison de 20 litres par habitant, le réservoir pourrait suffire pendant 4 ou 5 jours à l'alimentation de 27000 habitants.

Ce réservoir est destiné, en outre, à emmagasiner pendant la nuit le produit de la source, ce qui permet de doubler le volume d'eau employé pendant le jour; c'est, pendant l'été, chose nécessaire, afin de satisfaire aux besoins du service de l'arrosage.

L'établissement d'un second réservoir à Montmusard n'était pas moins nécessaire; d'abord, il emmagasine un certain volume d'eau et permet de prolonger la mise en chômage de l'aqueduc, si cette mesure est indispensable. Mais, son principal avantage est d'alimenter à lui seul la ville, lorsque des réparations forcent à fermer la première partie de la conduite principale; grâce aux communications établies entre tous les répartiteurs, le réservoir de Montmusard peut envoyer son eau, à peu près, à toutes les bornes-fontaines de Dijon.

Ce système remplace celui qui consiste à adopter pour l'artère principale une conduite fermée, c'est-à-dire partant du réservoir et y revenant de manière à être alimentée des deux côtés : les réparations dans une section n'entraînent que le chômage de cette section unique.

Enfin, comme nous l'avons vu dans la partie théorique, l'alimentation par deux réservoirs permet d'augmenter le débit de l'artère principale aux divers points de son parcours; les réservoirs emmagasinent pendant la nuit toute l'eau qu'ils rendent pendant le jour.

Le réservoir de Montmusard représente dans œuvre un carré de 29 mètres de côté, partagé en cinq parties égales par cinq voûtes en plein cintre de 5 mètres de diamètre, que séparent quatre piédroits de 1 mètre d'épaisseur.

La capacité de ce réservoir est de 3,177 mètres cubes.

Artère principale. — La première partie de l'artère principale, entre le réservoir de la porte Guillaume jusqu'à la rue Lamonnoye, a $0^m,35$ de diamètre et 967 mètres de longueur.

A la rue Lamonnoye, la conduite se bifurque en deux branches : la première, branchée rectangulairement sur la conduite de $0^m,35$ de diamètre, descend dans la rue Lamonnoye, retourne dans la rue Jehannin avec courbe de 40 mètres de rayon, et suit cette rue jusqu'à la cuve de distribution n° 1, la longueur de cette partie est de 444 mètres et son diamètre $0^m,162$, elle porte un robinet vanne à sa naissance et à son extrémité. La seconde branche se raccorde par un tuyau conique avec la conduite de $0^m,35$, elle dessert trois rues et vient déboucher aussi dans la cuve de distribution n° 1, après un parcours de $324^m,20$ avec un diamètre de $0^m,135$, elle est aussi munie de robinets vannes à ses deux extrémités.

De la cuve de distribution n° 1, part la conduite qui se prolonge jusqu'au réservoir de Montmusard; sa longueur est de $811^m,70$ et son diamètre $0^m,216$.

En tous les points hauts de ces conduites, on a placé des ventouses et des robinets de décharge à tous les points bas.

Cette artère principale alimente les répartiteurs et dessert directement treize bornes-fontaines au moyen de six ramifications secondaires peu importantes.

Comme on le voit sur le profil en long, on n'a pas hésité, pour la facilité des réparations et la surveillance de l'étanchéité de la conduite, à la placer en galerie sur une grande partie de sa longueur.

Les profils en travers des galeries sont représentés par les figures 4 et 5, planche 6.

Répartiteurs. — Les répartiteurs sont branchés sur l'artère principale : cinq sur le côté droit et cinq sur le côté gauche.

Leur diamètre, proportionné aux besoins qu'ils ont à desservir, est de $0^m,135$, $0^m,162$, $0^m,19$ (ce dernier alimente la gerbe d'eau de la place Saint-Pierre), $0^m,108$.

Dépense de la distribution intérieure. — La distribution d'eau de la ville de Dijon a entraîné une dépense totale de 1,250,000 francs, savoir :

Travaux extérieurs, aqueduc du Rosoir		357,967f,27
Réservoir de la porte Guillaume	53,520f,12	
— de Montmusard	49,128f,70	345,492,30
Galeries souterraines	227,652f,13	
Regards, rigoles de décharge, puits perdus	»	
Conduites posées en galerie		133,267f,79
— en tranchées		117,809f,19
Conduite en plomb de $0^m,034$ de diamètre		7,079f,40
Robinetterie		40,237f,52
141 bornes-fontaines		41,817f,60
Édicule sur le réservoir de la porte Guillaume		38,549f,12
Tour-udomètre sur le réservoir de Montmusard		4,877f,35
Bassin du jet d'eau de la porte Saint-Pierre		10,000f,00
Presse hydraulique pour éprouver les tuyaux		1,480f,20
Approvisionnements, dépenses diverses		58,787f,18
Assainissement de l'égout de Suzon		69,026f,61
Total		1,222,391f,63
Ou en nombre rond		1,250,000f,00

4° DISTRIBUTION D'EAU DE MARSEILLE

Par une loi du 4 juillet 1838, la ville de Marseille a été autorisée à dériver de la Durance un volume d'eau de $5^{mc},75$ par seconde, lors de l'étiage de cette rivière.

Pendant la plus grande partie de l'année, lorsque le niveau de la Durance est à $0^m,50$ au-dessus de l'étiage, le volume précédent se trouve à peu près doublé.

Le canal principal de dérivation a son origine à $187^m,25$ au-dessus du niveau de la mer, sur la rive gauche de la Durance, près du pont de Porthuis.

Sa longueur est de $81,753^m,87$, jusqu'au point où le canal se bifurque en entrant sur le territoire de Marseille et alimente deux branches, dirigées l'une à l'est et l'autre à l'ouest.

Le canal a une pente de $0^m,30$ par kilomètre; avec une hauteur d'eau de $1^m,50$ il débite le volume de $5^m,75$ par seconde, avec une vitesse de $0^m,84$.

Dans les souterrains, la pente a été portée à 1 mètre par kilomètre, afin de conserver le débit en réduisant la section.

Le canal principal a les dimensions suivantes :

Largeur à la cuvette	$3^m,00$
Largeur à l'étiage ($1^m,50$ au-dessus du fond)	$7^m,00$
Largeur au sommet	$9^m,40$
Profondeur totale du canal	$2^m,40$

La ligne principale comporte 46 tunnels d'une longueur de 16,914 mètres, et 11 grands ponts dont le principal est le pont-aqueduc de Roquefavour.

Les travaux de construction du canal ont coûté 16,799,551 fr. 08 et les embranchements sur le territoire de Marseille, 3,073,378 fr. 94.

Cette œuvre énorme est due à M. l'ingénieur de Montricher. La ville de Marseille est donc abondamment pourvue d'eau; malheureusement, l'eau de la Durance est fréquemment trouble, et les bassins de filtration sont quelquefois impuissants à la clarifier d'une manière complète.

Aqueduc de Roquefavour. — Il est impossible de ne pas donner ici la description du superbe aqueduc de Roquefavour, que représentent les figures 2 et 4 de la planche 7, extraite du *Traité d'architecture* de M. Reynaud[1] :

La longueur de cet aqueduc est de 393 mètres et sa hauteur maxima au-dessus de la base des socles 82^{m},65 ; sa largeur au sommet est de 4^{m},50. Il comprend trois étages de voûte :

Le 1er	étage a une hauteur de	34^{m},10	avec 12	arches de	15	mètres d'ouverture,
Le 2^{e}	—	37^{m},60	— 15	—	16	—
Le 3^{e}	—	10^{m},95	— 53	—	5	—

Les piles sont armées de contre-forts, dont elles excèdent la largeur de 2 mètres dans l'étiage inférieur; ces contre-forts règnent jusque sous la plinthe qui couronne le second étage.

Sans entrer dans les détails de construction des voûtes, détails qui appartiennent plutôt à un autre ouvrage, nous nous attacherons surtout à la cuvette.

Cette cuvette, maçonnée en briques, a 2 mètres de largeur au plafond, 2^{m},30 en gueule et 2^{m},40 de hauteur, avec une pente de 0^{m}.006 par mètre.

L'aqueduc de Roquefavour a coûté 3,700,000 fr.; il est d'un effet grandiose et d'une architecture élégante. Mais, il est probable qu'on ne l'établirait pas aujourd'hui, ou que tout au moins on le remplacerait par un aqueduc moins élevé, supportant plusieurs conduites forcées en fonte ou en tôle.

On arriverait de la sorte à une solution plus économique.

Débit de cet aqueduc. — Le débit est facile à calculer par la formule de Bazin,

$$ri = b_1 u^2$$

dans laquelle on prend pour b_1 la valeur qui convient aux parois unies.

Si la section était complétement pleine, l'aqueduc arriverait à débiter 20 à 25 mètres cubes à la seconde.

Si la hauteur d'eau dans la cuvette n'est que de 1^{m},50, la vitesse est de 4 mètres par seconde et la surface d'écoulement de 3^{m},15, ce qui fait un débit de 12^{m},60.

[1] Nous devons à l'obligeance de M. Léonce Reynaud, directeur des phares, ancien professeur d'architecture à l'école polytechnique, la magnifique planche qui contient à la fois l'aqueduc de Roquefavour et le pont du Gard. Cette planche est extraite de son *Traité d'architecture*, guide précieux dans toutes les parties de l'art de l'ingénieur. — (2 vol. et 2 atlas de 179 planches.)

5° DISTRIBUTION D'EAU DE SAINT-ÉTIENNE.

La distribution d'eau de Saint-Étienne présente quelques analogies avec celle d'Avallon précédemment décrite. M. l'ingénieur de Montgolfier en a donné tous les détails dans une notice insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées* de 1875. Cette notice traite en même temps la question du barrage du Furens, travail qui avait pour but la régularisation du cours de cette rivière et la préservation de la ville de Saint-Étienne contre les inondations.

Le barrage du Furens sera étudié dans une autre section de notre *Traité*, en même temps que les grands barrages en maçonnerie.

A mesure que l'agglomération de Saint-Étienne s'est accrue, les eaux du Furens se corrompirent et devinrent insuffisantes.

On songea d'abord à amener dans la ville les eaux de la Loire, dérivées par un canal ou élevées par machines ; on agit sagement en renonçant à ce projet qui était coûteux dans l'un comme dans l'autre cas, et qui ne fournissait que des eaux fréquemment troubles.

Un projet consistant à recueillir et à dériver les sources de la vallée haute du Furens fut présenté par MM. Graëff et Conte-Grandchamps, et accueilli par la municipalité.

Le produit de ces sources pouvant devenir insuffisant en été, le réservoir régulateur du Gouffre-d'Enfer, plus connu sous le nom de Barrage du Furens, fut chargé de parfaire le volume d'eau nécessaire à l'alimentation et à la salubrité de la ville.

Le travail exécuté se compose d'une série de canaux recueillant les sources pour les jeter dans un aqueduc principal, qui les amène dans un réservoir de distribution dominant la ville entière.

Aqueduc principal. — L'aqueduc principal reçoit, dans la partie haute de la vallée du Furens, les sources de vingt-deux ruisseaux qui prennent naissance dans les forêts de sapins dont sont recouverts les plateaux du mont Pilat ; à son passage près du réservoir du Gouffre-d'Enfer, il peut être mis en communication avec l'aqueduc de vidange de ce réservoir et lui emprunter un certain volume complémentaire.

L'aqueduc principal, de 17,385^{m},75 de long, présente une série de biefs à pente décroissante de 0,01 à 0,005 et 0,003, réunis au moyen de plans, inclinés de 0^{m},12 à 0^{m},30 par mètre ; ces plans inclinés créent des chutes de 6 à 33 mètres de hauteur, que l'on peut utiliser pour l'établissement d'usines.

Les figures ci-jointes représentent les profils en travers des diverses sections de l'aqueduc principal :

Le premier est à piédroits verticaux supportant une voûte en anse de panier ; sa hauteur libre est de 0^{m},52 sous clef ; sa largeur est de 0^{m},35 près du radier et 0^{m},36 aux naissances, disposition qui a pour but de faciliter le moulage ; ce type règne sur 5,061^{m},50 à l'origine de l'aqueduc de dérivation ;

Le second type, appliqué sur 2,187^{m},15, est ovoïde, avec une section libre de 0^{m},90 de hauteur, de 0^{m},60 de large aux naissances, et de 0^{m},355 au niveau du radier ;

Le troisième type, appliqué sur 4,395^{m},69, est ovoïde, avec une section libre de 1^{m},15 de hauteur, de 0^{m},70 de large aux naissances, et de 0^{m},483 au niveau du radier.

Pour ces trois types, exécutés en maçonnerie de ciment de Vassy, les épaisseurs respectives des parois sont de 0m,09, 0m,15 et 0m,18, et l'intérieur de la section

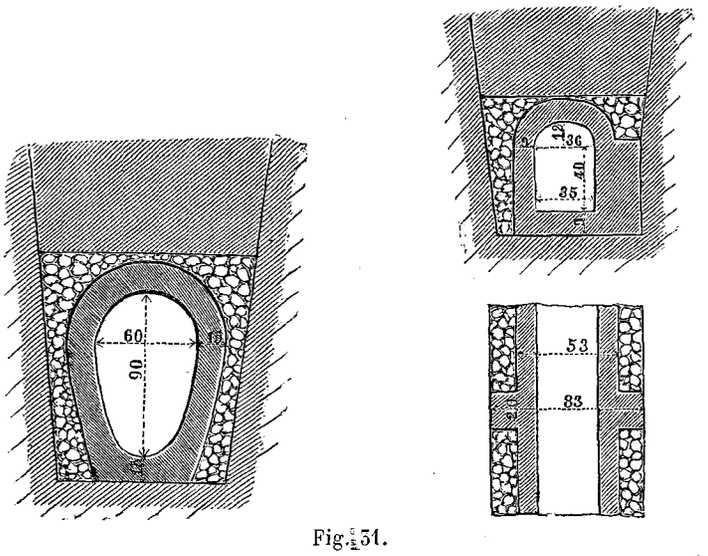

Fig. 51.

jusqu'au niveau des naissances est garni d'un enduit de mortier de ciment de Vassy de 0m,015 d'épaisseur pour le premier type et de 0m,03 pour les deux derniers.

Le type n° 3 a été amplifié encore sur 7,742m,41, dans la section qui aboutit au réservoir d'alimentation; sa hauteur a été portée à 1m,52, avec une largeur de 0m,80 au niveau des naissances, et de 0m,50 au niveau du radier.

L'aqueduc est partout établi en déblai et recouvert d'une couche de terre d'au moins 1m,20.

Sur les plans inclinés dont nous avons parlé, le profil est légèrement modifié en ce sens que le radier est construit sous forme d'escalier dont les marches ont 0m,50 de foulée et 0m,15 à 0m,20 de hauteur; grâce à cette disposition, les eaux, malgré leur grande vitesse, n'ont pu attaquer les enduits.

Tous les 5 à 6 mètres, dans les courbes, tous les 10 à 15 mètres dans les alignements droits, les aqueducs sont renforcés à l'extérieur par des contre-forts de 0m,20, qui relient les piédroits avec les parois des fouilles; le reste du vide est rempli en pierres sèches.

Partout où l'on avait à craindre quelque pression d'eau tendant à renverser l'aqueduc, on a établi par dessous des aqueducs de décharge ou des pierrées.

Regards. — Tous les 200 mètres on a placé des regards de service de 0m,80 de côté, dont les maçonneries ont 0m,20 d'épaisseur; ces regards correspondent à des puisards de 0m,20 de profondeur, où les sables s'accumulent et d'où on les enlève facilement.

A l'amont et à l'aval des chutes, on trouve des regards qui correspondent à des puisards de 1m,20 de profondeur, destinés à permettre l'installation des conduites en fonte qui dévieraient l'eau latéralement pour faire mouvoir des turbines, dans le cas où on voudrait utiliser ces chutes; le puisard d'aval a en outre pour objet d'amortir la vitesse de l'eau.

On a encore établi des regards aux points où les conduites de captage des sources viennent se souder à l'aqueduc principal. — Ces regards sont à deux compartiments, comme ceux établis par Darcy sur l'aqueduc du Rosoir pour les fontaines de Dijon : les deux compartiments sont séparés par une dalle verticale,

sur laquelle se déversent les eaux de la source qui ont déposé leur sable dans le premier compartiment. Le second compartiment communique avec l'aqueduc principal par un orifice que peut fermer un clapet métallique garni de cuir, battant sur une plaque de bronze, et manœuvré par une tige à crémaillère.

Déversoirs. — Sur quatre points de l'aqueduc, on a établi, au niveau des naissances, des déversoirs latéraux qui empêchent l'eau d'atteindre une hauteur dangereuse et de transformer l'aqueduc en conduite forcée.

Près du déversoir sont disposées deux vannes métalliques : l'une, vanne d'arrêt, capable d'intercepter la section de l'aqueduc jusqu'au niveau des naissances; l'autre, vanne de décharge, placée dans un puisard en contre-bas, permet de vider complétement une section d'aqueduc et de la visiter, si c'est nécessaire.

Construction des divers types de l'aqueduc. — La construction du premier type de l'aqueduc s'opérait comme il suit :

La maçonnerie de ce premier type est faite avec mortier de ciment de Vassy, composé de 1 volume de ciment et 1 volume de sable granitique fin et lavé. — Une première brigade d'ouvriers confectionne le radier et l'établit suivant la pente voulue, indiquée par des piquets. — Une seconde brigade établit les piédroits, en se servant d'un gabarit formé de deux planches de 3 mètres de long, s'appliquant l'une sur un piédroit, l'autre sur le piédroit opposé ; les deux planches sont maintenues à l'écartement voulu par des crochets en fer et des tasseaux de calage : lorsque la maçonnerie était achevée, on n'avait qu'à enlever les tasseaux et à dégager les crochets pour replier les deux planches et les porter plus loin. — Une troisième brigade établissait les solins du radier et appliquait l'enduit. — Une quatrième brigade préparait, dans le voisinage, au moyen de moules en tôle avec charnières, des morceaux de la petite voûte destinée à recouvrir l'aqueduc; on introduisait à la partie supérieure des moules un mélange de 2 volumes de mortier pour 1 volume de pierre cassée. — Au bout de huit à dix minutes, le mélange avait fait prise, on dégageait les crochets et on faisait tourner autour des charnières le châssis supérieur du moule; on laissait sécher la pièce pendant deux ou trois jours, à l'abri du soleil, puis on venait l'appliquer sur les piédroits en interposant une couche de mortier de ciment de $0^m,02$; on faisait par la compression refluer le ciment, et il n'y avait plus qu'à enlever les bavures à la truelle. — Quand un châssis avait servi, on le nettoyait et on le lavait avant de procéder à une nouvelle opération.

Les types n° 2, n° 3 et n° 4 étaient construits tout entiers sur place par des procédés analogues, avec un mortier composé de 1 volume de ciment pour 2 volumes de sable. — La voûte était établie au moyen de cintres présentant une charnière à la clef, de manière qu'une moitié de cintre pouvait se rabattre sur l'autre : un grand crochet, placé suivant le diamètre des naissances, maintenait l'écartement des deux moitiés du cintre; mais, lorsqu'on dégageait ce crochet les deux moitiés du cintre se repliaient et pouvaient être reportées plus loin pour servir à la confection d'une nouvelle longueur de voûte.

Le pont aqueduc du Pas-du-Riot a été construit de même en maçonnerie de moellons et de mortier de ciment de Vassy; une fissure s'étant produite après le décintrement, a été entaillée en biseau sur $0^m,05$ de profondeur et $0^m,10$ de largeur, puis remplie de goudron végétal mêlé d'un peu de bitume, et recouvert d'un enduit de ciment de $0^m,03$ d'épaisseur. La fuite n'a plus reparu.

Prix de revient. — Les prix de revient sont très-intéressants à connaître, car le mode de production des aqueducs précédents est susceptible d'applications nombreuses.

PRIX D'UN MÈTRE CUBE DE MORTIER DE CIMENT.		PRIX DU MÈTRE CUBE DE MAÇONNERIE EN MATÉRIAUX DE PETITE DIMENSION AVEC LE MORTIER PRÉCÉDENT,		POUR LES TYPES N° 2 à 4.	
	francs.	POUR LE TYPE N° 1.	francs.		francs.
700 kilogrammes de ciment à 9 francs. .	63,00	0m,50 de mortier à 70f,40.	35,20	0m,40 de mortier à 1 de ciment pour 2 de sable à 52f,20.	20,88
0m,80 de sable à 3 francs.	2,40	0m,80 de petits matériaux à 2f,50. . . .	2,00	1m,10 de moellons à 2f,25.	2,47
Façon du mortier.	5,00	Façon, enduits, moulage, pose.	15,00	Façon de la maçonnerie.	5,00
Total. . . .	70,40	Outils, faux frais, soudure.	2,35	Enduits et chape en mortier de 1 de ciment pour 1 de sable.	3,00
		Total.	54,55	Cintres, outils, faux frais.	1,57
		Bénéfice 1/10. . .	5,45	Total. . . .	32,92
		Total.	60,00	Bénéfice. . .	3,29
				Total. . . .	36,21

Le prix du mètre courant du type n° 1 est ressorti à 11f,20 y compris 0f,46 pour garnissage en pierres sèches.

— — 2 — 23f,57 — 0f,90 —

— — 3 — 30f,12 — 1f,20 —

L'aqueduc principal, y compris les terrassements et tous les accessoires, est revenu à 62 francs le mètre courant.

Captage des sources. — Le principe, dit M. de Montgolfier, qui a présidé au captage des sources, est le suivant :

« Dans chaque affluent, capter les sources autant que possible à leur point d'émergence, les introduire dans des conduites fermées d'où elles ne puissent plus s'échapper, les diriger ainsi, suivant la déclivité du terrain, dans des collecteurs établis au bas de la vallée et, de là, dans l'aqueduc principal. »

1° Lorsqu'on avait découvert une source, se manifestant à la surface par un suintement, on exécutait une fouille jusqu'au rocher et on la fermait à l'aval par un barrage en maçonnerie de ciment de $0^m,15$ d'épaisseur et de $0^m,40$ de hauteur, dans lequel on encastrait, soit un drain en poterie, soit une conduite en béton de ciment, destinée à emmener le produit de la source. A l'amont du barrage, le drain encastré se prolongeait par un drain en poterie à manchons à joints ouverts qu'on recouvrait d'une pierrée pour faciliter l'introduction de l'eau. Le fond et les parois de la fouille à l'emplacement de la source sur une longueur d'environ 1 mètre, étaient revêtus d'une maçonnerie de ciment de $0^m,10$ d'épaisseur, formant cuvette étanche à l'amont du barrage. La fouille était remplie de pierres qu'on revêtait d'un corroi argileux de $0^m,10$ d'épaisseur, arrosé d'un lait de chaux; le remblai s'achevait avec de la terre ordinaire.

2° Les conduites tertiaires des sources sont amenées dans des conduites secondaires, qui, elles-mêmes, recueillent les suintements des tranchées qui les contiennent. Ces suintements sont arrêtés par des barrages, analogues à celui que nous venons de décrire plus haut, établis à l'aval des parties aquifères.

3° Des collecteurs reçoivent dans chaque vallée le produit des conduites tertiaires et secondaires; ces collecteurs sont aussi munis de barrages, partout où se montrent des suintements; ils suivent la pente de la vallée, en se tenant toutefois à une certaine distance du thalweg, pour éviter les eaux d'inondation.

Toutes ces conduites sont souterraines.

Des regards rectangulaires de $0^m,60$ de largeur, sont placés à l'aval des sources importantes et à la jonction de plusieurs conduites. Le tuyau d'aval est $0^m,10$ au-dessous du tuyau d'amont et, à $0^m,10$ au-dessus de ce dernier, le regard est muni d'un déversoir, de sorte que la charge sur le tuyau d'aval ne dépasse pas $0^m,20$.

Les conduites de captage ont un développement total de 53 kilomètres et s'étendent sur une surface de 220 hectares, appartenant à la ville de Saint Étienne.

Elles sont en tuyaux de poterie ou en pièces moulées avec du mortier de ciment :

1° les tuyaux de drainage de $0,^m05$ à $0^m,06$ de diamètre, réunis par des manchons lutés avec du ciment, sont revenus à 1 franc le mètre; on en assemble plusieurs ensemble avant la pose, afin de ne poser à la fois que des longueurs de 1 mètre à $1^m,20$;

2° Les conduites en mortier de ciment sont analogues à celle que représente la figure 32 ; les morceaux sont préparés dans des moules, comme nous l'avons expliqué, et assemblés dans la fouille, en interposant dans les joints une couche de $0^m,02$ de ciment, puis enlevant les bavures.

La conduite de $0^m,15$ d'ouverture est revenue à 3 francs 80 le mètre courant,

et la conduite à section carrée de 0m,12 d'ouverture est revenue à 3 francs 10.

Le débit de l'ensemble des sources ainsi captées varie de 60 à 450 litres par seconde. Pour donner à la ville 150 litres par habitant, il faut 13,000 mètres cubes par 24 heures ; aussi, doit-on emprunter au réservoir du Furens jusqu'à 8,000 mètres cubes par jour dans les grandes sécheresses.

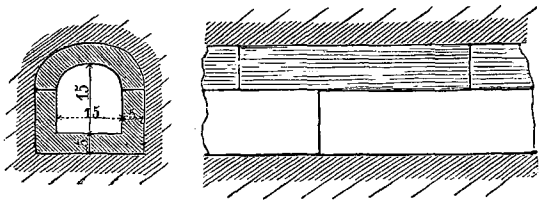

Fig. 32.

L'eau distribuée est d'excellente qualité, et, malgré son long voyage, sa température ne dépasse pas 10° à 11°. C'est donc une eau très-fraîche en été.

Distribution intérieure. — L'eau de l'aqueduc est amenée dans le bassin du Rey à la côte 618m,75 ; ce bassin a une capacité de 7,000 mètres cubes.

La ville de Saint-Étienne présente, entre ses divers quartiers, des différences d'altitudes considérables ; ainsi, la place Royale n'est qu'à 517 mètres, tandis que les quartiers hauts vont jusqu'à 595 mètres.

M. de Montgolfier eut l'idée de desservir toute la ville par deux réseaux : le réseau supérieur et le réseau inférieur.

Le réseau supérieur a deux artères, qui partent d'une conduite principale de 0m,50 de diamètre, partant elle-même du bassin du Rey : l'artère Est s'élève au Jardin des plantes à la côte 591 et y alimente un bassin de 1,100 mètres cubes ; elle redescend sur la place Fourneyron et s'élève ensuite jusqu'au point culminant du quartier du grand Cimetière à la côte 570 ; cette artère a un diamètre de 0m,216.

L'artère Ouest a d'abord un diamètre de 0m,30, elle alimente le bassin de Sainte-Barbe de 1,100 mètres cubes, prend ensuite un diamètre de 0m,216, puis se bifurque en deux conduites : l'une de 0m,135, l'autre de 0m,108 de diamètre, alimentant deux quartiers différents.

Une conduite supplémentaire de 0m,25 de diamètre, part du bassin du Rey et se rend au Jardin des plantes ; grâce à elle et aux deux réservoirs secondaires, on peut assurer le service dans le cas où la conduite de 0m,50 est en réparation.

Le reséau supérieur alimente les quartiers qui se trouvent au-dessus de la courbe de niveau 540 ; le réseau inférieur alimente la partie centrale de la ville.

Ce réseau se compose d'une conduite de 0m,30 de diamètre, qui met l'artère Ouest du réseau supérieur en communication avec le réservoir de Champagne, d'une capacité de 6,700 mètres ; du réservoir de Champagne part une conduite de 0m,30, qui traverse toute la ville en suivant la route Nationale, n° 82 ; comme toutes les rues de la ville coupent cette voie normalement, les embranchements ou répartiteurs sont d'un établissement bien facile.

Le réservoir de Champagne serait insuffisant à assurer l'alimentation de la partie basse ; aussi a-t-on établi, au moyen de quatre cuves, des communications entre le réseau supérieur et le réseau inférieur, et par ces cuves on se procure le volume supplémentaire qui peut être nécessaire.

La canalisation intérieure a coûté.	640,000 francs.
Les bassins ont coûté.	280,000 —
La distribution intérieure s'élève donc à. . .	920,000 —

Tous les travaux de la distribution, y compris la création du réservoir du Gouffre-d'Enfer, ont entraîné une dépense de 4,800,000 francs.

6° DISTRIBUTION D'EAU DE NEW-YORK.

Dans la relation si intéressante de son voyage en Amérique, M. Malézieux, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a donné des renseignements sur les distributions d'eau des principales villes des Etats-Unis; ce sont ces renseignements que nous allons résumer.

La ville de New-York est établie au fond de la baie de l'Hudson, sur la rive gauche de la rivière d'Hudson, dans une île formée par cette rivière, par son affluent la rivière de l'Est et par la rivière de Harlem, faux bras de l'Hudson qui réunit ce fleuve avec la rivière de l'Est.

A 64 kilomètres en amont de New-York, l'Hudson reçoit la rivière du Croton, dont le débit d'étiage est de 122,661 mètres cubes par 24 heures ou 1,420 litres à la seconde.

Le lit du Croton a été intercepté par un barrage, qui surélève de $12^m,20$ le niveau de l'étiage; on emmagasine ainsi, dans un lac artificiel de 160 hectares, 2,271,500 mètres cubes d'eau, et cette réserve compense l'insuffisance du débit d'été.

Cette réserve elle-même a été insuffisante dans ces dernières années et on a créé de nouveaux barrages dans les parties hautes de la vallée du Croton.

En amont du premier barrage du Croton, la superficie du bassin est de 875 kilomètres carrés, et la hauteur moyenne annuelle de pluie est de $1^m,12$. Le sol étant peu perméable, on a évalué à 36 pour 100 les pertes par infiltration et évaporation à la surface du sol et à 19 pour 100 les pertes par évaporation dans le réservoir; on peut donc recueillir 45 pour 100, soit environ la moitié de la pluie tombée.

C'est presque un million de mètres cubes, dont on pourra dans l'avenir disposer tous les jours.

L'aqueduc de dérivation part du barrage du Croton, suit la vallée de cette rivière pendant 9 kilomètres, puis se développe sur la rive gauche de l'Hudson. Il franchit en siphon ou en pont siphon plusieurs vallées d'importance variable; les principales sont la vallée de Harlem, franchie par un pont siphon et la vallée profonde de Manhattan, que traverse un siphon simple.

Les eaux de l'aqueduc se déversent dans les réservoirs de réception, situés dans le parc central sur la colline d'York.

Les réservoirs de réception sont réunis par des conduites en fonte aux réservoirs de distribution, situés à $3^k,5$ de là sur la colline de Murray, près de la cinquième avenue.

Le développement total de la dérivation est de 65,269 mètres.

L'aqueduc est maçonné dans toute la partie en amont du réservoir de récep-

tion, sauf dans les parties en conduite forcée où l'on a adopté des tuyaux en fonte ou en tôle.

La pente de l'aqueduc en amont de la rivière de Harlem est de $0^m,21$ par kilomètre et de $0^m,14$ en aval. Le tracé présente des déblais et des remblais considérables; il existe sur le parcours seize tunnels et vingt-cinq passages de cours d'eau.

La section intérieure de l'aqueduc est un plein cintre de $1^m,13$ de rayon, établi sur des piédroits inclinés que relie à la base un radier concave de $2^m,04$ de corde et $0^m,23$ de flèche. La maçonnerie de l'aqueduc, pour le profil de tunnel en terre meuble, a une épaisseur de $0^m,305$ formée par trois rangs de briques.

Lorsque la construction est en remblai, elle repose sur un massif de pierres sèches et le tout est englobé de terre; malgré les précautions prises pour l'exécution du massif, il y a eu des tassements et des ruptures de maçonnerie; un bon remblai en terre franche et sable, bien pilonné, eut sans doute conduit à de meilleurs résultats.

« L'ingénieur, M. Jervis, tenait beaucoup, dit M. Malézieux, à soustraire les maçonneries de l'aqueduc, et principalement la cuvette, à l'influence de la gelée. Dans une note écrite en 1842, il exprimait l'opinion qu'il n'est guère possible de faire des maçonneries susceptibles de rester toujours étanches ; l'humidité tout au moins finit par les pénétrer et par atteindre les parements extérieurs ; viennent alors les gelées intenses du climat de New-York, et l'on peut être certain que les cuvettes maçonnées de ponts-aqueducs ou ponts-canaux n'auront qu'une existence limitée. Avec cette préoccupation on s'explique que cet habile ingénieur ait songé à enterrer même l'aqueduc en remblai. »

Le ravin de Sing-Sing, qui est à $19^m,21$ en contrebas de la ligne de fond de l'aqueduc, est franchi par un pont-aqueduc : arche en maçonnerie de $26^m,84$ d'ouverture et de $9^m,96$ de flèche. Pour obtenir une cuvette bien étanche, on a appliqué sur la maçonnerie une chemise en fonte, recouverte elle-même d'un placage de briques et ciment. Les murs latéraux de la cuvette sont séparés des murs de tête du pont par une rainure vide de $0^m,15$ de large; cette rainure recueille les filtrations et renferme un matelas d'air isolant.

La vallée de la rivière de Harlem a 440 mètres de largeur suivant la ligne de fond de l'aqueduc ; elle est franchie par un pont-siphon. Comme on voulait réserver pour la navigation un passage d'une hauteur d'au moins 30 mètres, le pont se compose de 15 arches en plein cintre, dont 8 de $24^m,40$ d'ouverture et 7 de $15^m,25$. Le pont supporte deux conduites en fonte de $0^m,90$ de diamètre, situées à $3^m,66$ en contrebas de la ligne de fond de l'aqueduc.

On a prévu pour le siphon ainsi constitué une chute de $0^m,61$ qui s'est à peu près réalisée.

En 1862, les deux conduites de $0^m,90$ de diamètre devenant insuffisantes, on a posé au-dessus d'elles un tuyau en tôle de $2^m,30$ de diamètre, et on a exhaussé les murs de tête du pont de manière à envelopper ce tuyau dans une galerie maçonnée.

Au niveau de la ligne de fond de l'aqueduc, la vallée de Manhattan a 1275 mètres de large et $31^m,11$ de creux. Elle est franchie en siphon par quatre conduites en fonte : trois de $0^m,91$ de diamètre et une de $1^m,22$. La chute ménagée pour ces conduites forcées est de $0^m,91$, elle a été bien suffisante.

Il y a deux réservoirs de réception, exécutés dans le parc central partie en déblai, partie en remblai : le déblai descend jusqu'à 11 mètres dans le sol, et la profondeur d'eau totale atteint à peu près cette valeur; les digues d'enceinte

sont en terre et corroi central avec talus perreyé à l'extérieur ; les digues intérieures de partage sont simplement en terre : un des réservoirs a une superficie de 14 hectares et contient 616000 mètres cubes, l'autre a une superficie de 40 hectares et contient 3,624,000 mètres cubes.

Les réservoirs de réception communiquent avec le réservoir de distribution par six conduites de $1^m,22$ de diamètre; ce réservoir est à parois en maçonnerie, il est voûté et recouvert de terre ; sa contenance est de 76,000 mètres cubes.

En ce qui touche la distribution intérieure, toutes les conduites sont simplement posées en terre et le diamètre des conduites en fonte atteint jusqu'à $1^m,52$; cette dimension n'a pu être dépassée avec la fonte.

Dans tout le parcours du lac de Croton aux conduites de la ville, la température de l'eau ne varie guère : elle reste celle du lac. Cette température peut donc descendre presque à zéro en hiver et monter à 25° en été.

« Quel avantage, dit M. Malézieux, d'avoir des eaux de sources comme celles de la Dhuis, dont la température à peu près constante n'est pas montée à plus de 13° à Paris dans les plus fortes chaleurs de 1865. »

Les réservoirs à ciel ouvert s'opposent au maintien d'une température constante. Aussi l'usage de la glace est-il universel à New-York.

En 1870, la quantité d'eau distribuée à New-York s'élevait par jour à 308,040 mètres cubes, pour 942,292 habitants ; cela fait 227 litres par habitant.

7° DISTRIBUTION D'EAU DE WASHINGTON.

Washington et Georgetown, séparées par la petite rivière Rock-Creek, sont alimentées par une dérivation du Potomac.

L'aqueduc, de 21 kilomètres de longueur, a une section circulaire de $2^m,75$ de diamètre intérieur et de $3^m,36$ de diamètre extérieur (fig. 1, pl. 14.) Cette forme de section est celle qui, théoriquement, convient le mieux à un aqueduc puisqu'elle a le moindre périmètre pour un volume donné. La maçonnerie comprend 3 anneaux de briques et probablement est revêtue, au moins à l'intérieur, d'un enduit en ciment.

La pente kilométrique de l'aqueduc est de $0^m,143$.

Lorsque le barrage du Potomac sera complet, l'aqueduc donnera tout ce qu'il peut débiter soit 300000 mètres cubes en vingt-quatre heures; actuellement on n'utilise que 45000 mètres cubes, ce qui, pour 120583 habitants, fait 372 litres par tête.

Le barrage du Potomac est en pierres de taille avec parements peu inclinés ; il est renforcé à l'amont par un remblai recouvert d'enrochements, et la dalle de couronnement est reliée par des crampons en fer à l'assise inférieure ; grâce à ces précautions, l'ouvrage a bien résisté aux crues et aux débâcles.

C'est sur le trajet de l'aqueduc du Potomac qu'on trouve le pont de Cabin-John, grande arche en maçonnerie de $67^m,10$ d'ouverture et de $11^m,36$ de flèche.

C'est aussi sur cet aqueduc qu'on trouve les deux ponts de College-Branch et de Rock-Creek, composés d'arcs en fonte ; ces arcs ne sont autres que des tuyaux convenablement courbés et assemblés comme des voussoirs ; l'eau de la dérivation passe à l'intérieur ; l'arc en fonte et la conduite ne font qu'un et constituent un aqueduc-pont. Sur le Rock-Creek, on a ainsi jeté deux conduites en arc de

cercle de 61 mètres d'ouverture, de $6^{m},10$ de flèche et de $1^{m},22$ de diamètre intérieur ; ces deux conduites supportent un tablier métallique soumis à une circulation considérable. Nous avons donné une description sommaire de ces ouvrages à la page 228 de notre *Traité des ponts métalliques*.

8° DISTRIBUTION D'EAU DE PARIS.

Historique [1]. — Nous ne saurions faire ici l'histoire complète des eaux de Paris et nous nous contenterons d'en présenter un résumé chronologique.

Lutèce, réduite à l'île de la Cité, puisait à la Seine les eaux qui lui étaient nécessaires.

L'empereur Julien fit construire pour les Thermes de la rive gauche un aqueduc venant d'Arcueil, aqueduc détruit au neuvième siècle par les Normands.

Au moyen âge, les moines de l'abbaye de Saint-Laurent, située au pied de la butte Montmartre, amenèrent les eaux du Pré-Saint-Gervais, qui viennent des hauteurs de Romainville et de Ménilmontant.

En 1244, il existait dans l'abbaye de Saint-Martin des Champs une fontaine alimentée par l'aqueduc des eaux de Belleville.

De 1180 à 1222, Philippe Auguste fit établir la fontaine des Halles et celle des Innocents, qui tiraient leurs eaux de la fontaine Saint-Lazare, alimentée elle-même par l'aqueduc du Pré-Saint-Gervais ; il construisit en outre la fontaine Maubuée, alimentée par l'aqueduc de Belleville.

En 1265, le couvent des Filles-Dieu fut autorisé à prendre le volume d'eau dont il avait besoin sur la conduite venant de la fontaine Saint-Lazare aux Halles.

En 1392, Charles VI révoque les concessions particulières qui mettaient en chômage les fontaines publiques.

En 1457, le prévôt des marchands et les échevins font réparer l'aqueduc de Belleville et la municipalité prend ainsi possession des conduites d'eau ; cette possession n'était pas solidement établie, car plus d'une fois le roi et les personnages importants de la ville détournèrent à leur profit les eaux des fontaines publiques.

Avant le règne de Louis XII, le nombre des fontaines publiques fut porté à 16, mais les deux sources d'alimentation étaient toujours les aqueducs de Belleville et du Pré-Saint-Gervais.

En 1529, François Ier sollicite du bureau de ville une concession particulière et fait ériger la fontaine de la Croix-du-Trahoir, alimentée par le réservoir des Halles ; le prévôt des marchands, Jehan Tronson, en récompense de ses services, reçoit en même temps la permission de dériver de cette fontaine un filet d'eau de la grosseur d'un pois.

En 1550, les concessions particulières ayant tari les fontaines publiques, des lettres patentes de Henri II ordonnèrent aux particuliers de présenter les titres de leurs concessions.

[1] L'histoire des eaux de Paris jusqu'au commencement de ce siècle, a été faite en détails dans l'ouvrage intitulé : *Mémoire sur le canal de l'Ourcq*, par Girard, inspecteur général des ponts et chaussées, créateur du dit canal, un des savants qui accompagnèrent Bonaparte en Égypte.

Cette formalité de la présentation des titres fut ordonnée à nouveau en 1587.

Un des premiers ordres donnés par Henri IV, à son entrée dans Paris, fut celui de réparer les fontaines publiques, et de leur restituer toutes les eaux qui en avaient été détournées.

C'est en 1598 que fut inauguré le système des concessions à prix d'argent en faveur de Martin Langlois, prévôt des marchands.

En 1606, construction dans l'île de la Cité de la fontaine du Palais, alimentée par les eaux du Pré-Saint-Gervais, qui passaient sous le pavé du pont au Change.

Par lettres patentes de 1608, Henri IV révoque formellement les concessions particulières, à l'exception de celles accordées aux princes du sang et à quelques communautés religieuses.

A la même époque, Henri IV et Sully firent ériger la pompe de la Samaritaine, qui élevait les eaux de la Seine dans un réservoir placé sur le pont Neuf, d'où elles se rendaient aux Tuileries et au Louvre, ce qui permit d'abandonner au public la fontaine de la Croix-du-Trahoir. La pompe de la Samaritaine fut l'œuvre d'un Flamand, nommé Jean Lintlaer.

A la mort d'Henri IV, les concessions particulières recommencèrent à envahir le domaine public.

On commençait à se préoccuper de la création de l'aqueduc d'Arcueil; Sully avait donné l'éveil à ce sujet, en ordonnant de rechercher les vestiges de l'aqueduc Romain. Ce qui accéléra la dérivation des eaux d'Arcueil, ce fut la création du Luxembourg, par Marie de Médicis.

Il fallait pourvoir d'eau le nouveau palais; en 1612, un particulier nommé Joseph Aubry, offrit d'amener les eaux des fontaines de Rungis, dans un réservoir établi entre les portes Saint-Jacques et Saint-Michel.

En 1615, la première pierre du grand regard des fontaines de Rungis est posée par le roi Louis XIII, en présence de toute la cour.

L'aqueduc d'Arcueil devait fournir 30 pouces d'eau, 18 pour le roi et 12 pour la ville qui en disposait à sa volonté.

En 1623, les eaux d'Arcueil arrivèrent au regard de la porte Saint-Jacques et furent réparties entre les ayants droit.

En 1624, le roi posa la première pierre de la fontaine de la Grève, alimentée par une conduite des eaux d'Arcueil.

Quatorze autres fontaines publiques se partagèrent ces eaux.

Néanmoins, la multiplicité des dérivations particulières, l'ignorance où l'on était des lois de l'écoulement, ne tardèrent pas à produire de nouvelles disettes d'eau et à susciter de nouvelles plaintes.

En 1651, un sieur Bocquet, bourgeois de Paris, exécuta de concert avec la ville des travaux de captage qui portèrent de trente à cinquante-quatre pouces le débit des eaux d'Arcueil.

En 1653, le surintendant Fouquet achète moyennant la somme de 10000 livres un pouce d'eau à prendre sur les sources de Belleville et du Pré-Saint-Gervais.

François Villette et Girard Desargues avaient en 1626 présenté le projet d'élever les eaux de la Seine; en 1656, ce projet fut repris par Mathurin de Mouchery qui proposait d'établir sa machine hydraulique à l'entrée des fossés de l'Arsenal.

En 1666, les concessions de toutes natures, et surtout les concessions honorifiques, s'étaient tellement développées, qu'il fallut les supprimer toutes sans exception.

En 1666, Regnault de la Fontaine propose d'établir, pour l'alimentation du

faubourg Saint-Germain, une machine hydraulique prenant les eaux de la Seine entre le Pré aux clercs et l'île des Cygnes (aujourd'hui terre-plein du pont Neuf); sa proposition n'est pas accueillie.

En 1669, Daniel Jolly proposa d'acquérir le moulin à blé situé sur la troisième arche du pont Notre-Dame, du côté du quai de Gesvres, et de substituer au mécanisme du moulin quatre corps de pompes aspirantes et foulantes, dont une nouvelle roue à aubes entretiendrait le jeu. — Ce projet fut accueilli; le fonctionnement des appareils de la Samaritaine en garantissait, du reste, le succès.

En 1670, Jacques Demance, gendre de Ricquet de Bonrepos, présenta le projet d'une seconde machine à huit corps de pompe qui devaient être mis en jeu par les roues d'un second moulin placé sur le pont Notre-Dame; la réception de cette machine fut faite en mai 1671.

En deux ans, on établit quinze nouvelles fontaines publiques, alimentées avec les eaux des machines que nous venons de signaler; le volume des eaux distribuées se trouve doublé, et la ville fait l'acquisition des deux moulins du pont Notre-Dame, 1673.

Malheureusement, les machines fonctionnaient d'une manière irrégulière; elles étaient souvent entravées par les glaces et les crues, et, faute d'entretien, leur puissance allait sans cesse en diminuant.

En 1695, nouvelle machine hydraulique, établie sous le pont de la Tournelle par Friquet de Vaurose.

En 1700, Rennequin, mécanicien célèbre, est chargé de réparer et même de reconstruire les machines du pont Notre-Dame.

La même année, Gaspard Boisson établit, dans le pavillon de l'Arsenal, un corps de pompe mis en jeu par un manége; l'eau qui en provenait devait alimenter la place Royale et le quartier du Temple.

En 1707, la machine de la Tournelle, qui ne donnait plus rien, fut démolie.

La même année, de Chamillart, contrôleur général des finances, fait élever la fontaine Louis-le-Grand; en 1713, on construit la fontaine Desmarets, au carrefour des rues Montmartre, Saint-Marc et Feydeau; et, en 1715, la Princesse palatine élève à ses frais la fontaine de la rue Garancière; en 1718, Joseph Chaudron en fait autant pour la fontaine du Chaudron, à la Villette.

En 1737, Bélidor est chargé de perfectionner les machines du pont Notre-Dame, et en porte le débit de 100 à 150 pouces.

De 1737 à 1740, les eaux de Belleville sont détournées des fontaines et employées au lavage du grand égout, qui, avant M. de Turgot, n'était qu'un simple fossé creusé dans les marais du Temple, du faubourg Saint-Denis, de la Chaussée-d'Antin, de la Ville-l'Évêque et des Champs-Élysées; quand les habitations s'étendirent de ce côté, le grand égout exhalait des odeurs méphitiques; on le nettoya par les eaux de Belleville, et on ne tarda pas à le voûter.

En 1737, deux étrangers présentent le projet d'une pompe à feu au moyen de laquelle on aurait élevé une certaine quantité d'eau sur la place de l'Estrapade.

En 1746, on érige la fontaine monumentale de la rue de Grenelle, due à Bouchardon; et un sieur Joseph Amy, avocat au parlement de Provence, présente deux machines propres, l'une à élever, l'autre à clarifier les eaux. — Le filtre était, paraît-il, composé d'éponges; il fut l'objet d'un rapport favorable des académiciens Réaumur et Granjean de Fouchy.

En 1761, les machines hydrauliques du pont Notre-Dame sont à nouveau réparées. En 1762, l'académicien Deparcieux propose d'amener à Paris, par un canal de dérivation, les eaux de l'Yvette, rivière qui prend sa source entre Ver-

sailles et Rambouillet, et tombe dans la rivière d'Orge, un peu au-dessus de Juvisy.

Ce projet fut combattu énergiquement par la compagnie qui sollicitait la concession de pompes à feu destinées à élever l'eau de Seine, 1765.

Lavoisier, en 1771, examina les deux projets; il montra que les pompes à feu seraient plus économiques pour obtenir un petit volume d'eau; mais que, pour un gros volume, l'aqueduc de dérivation devait avoir la préférence. — Cependant, en 1769, Perronet et Chezy avaient terminé les études du canal de l'Yvette, et ils donnèrent le projet complet en 1775. Le manque de fonds força d'ajourner l'exécution.

En 1776, MM. Périer frères obtinrent la concession de machines à feu destinées à prendre 150 pouces d'eau dans la Seine et à les élever dans des réservoirs convenablement placés. — Une compagnie, composée des principaux capitalistes de Paris, fut organisée en 1778, et, en 1782, on distribua les eaux des pompes à feu de Chaillot.

De 1778 à 1786, un agiotage effréné se porta sur les actions des eaux de Paris; ces actions atteignirent 5,000 livres, et Mirabeau signala dans un mémoire l'absurdité de pareils cours; l'expérience ne tarda pas à lui donner raison.

En 1787, l'entreprise des pompes à vapeur tombe en discrédit; un seul banquier se trouve en possession de la plupart des actions, et finit par vendre son privilége à la ville de Paris. — Une administration royale était établie pour surveiller les ouvrages et dépendances du service des eaux.

En 1788, on entreprend le canal de l'Yvette; le travail marche lentement, et se trouve interrompu par les événements de la Révolution.

La vente de l'eau aux particuliers est elle-même arrêtée.

En 1792, on nomme un ingénieur hydraulique de la commune de Paris.

En 1790, le sieur Brullée présente à l'Assemblée nationale le projet de dérivation des eaux de la Beuvronne, petite rivière qui coule au nord-est de Paris et se jette dans la Marne. — Une loi de 1791 en autorise l'exécution.

En 1800, les concessionnaires du canal de la Beuvronne modifient le projet et font remonter leur prise d'eau jusqu'à la rivière d'Ourcq, près de Lisy.

En mai 1802, est rendue la loi qui ordonne « qu'il sera ouvert un canal de dérivation de la rivière d'Ourcq, et qu'elle sera amenée à Paris dans un bassin près de la Villette » ; un arrêté du Premier Consul confie l'exécution du travail aux ingénieurs des ponts et chaussées, et décide que la dépense sera prélevée sur le produit de l'octroi de Paris.

C'est, en effet, sous les ordres de Girard qu'a été construit le canal de l'Ourcq: le réservoir général est établi sur le plateau de la Villette; à partir du réservoir, on peut tracer, de l'est à l'ouest, au pied de la butte Montmartre, une ligne de niveau, c'est le premier aqueduc. — On peut étendre cette ligne de niveau du côté opposé, en contournant les collines de Belleville, Ménilmontant et Charonne; c'est le second aqueduc. — La dépense d'eau des aqueducs était fixée à 80,000 mètres cubes par 24 heures. — On trouvera, dans les mémoires de Girard les principales dispositions adoptées pour la distribution et les conduites : ces dispositions sont aujourd'hui sans intérêt.

État actuel des eaux de Paris. — M. l'ingénieur Huet a donné, dans un rapport sur l'Exposition universelle de 1867, une description sommaire de l'état du service des eaux de la ville de Paris. — Voici cette description :

« Paris s'est ressenti, plus que toute autre ville de France, de l'impulsion donnée par l'Empire à tous les travaux qui intéressent la santé et le bien-être

natériel des populations. Le programme général de son alimentation comme de ,on assainissement a été tracé par le préfet de la Seine, M. le baron Haussmann, lans un remarquable rapport de 1854.

« En 1854, Paris ne disposait, par jour, que de 148,000 mètres cubes d'eau, ournis pour la plus grande partie par le canal de l'Ourcq, création du premier Empire; et sur les 100,000 mètres cubes provenant de cette source d'alimentation, il ne pouvait, eu égard à l'insuffisance de son système de distribution, en ıtiliser que moitié; il ne jouissait donc réellement que de 90 à 100,000 mètres ;ubes d'eau par jour, soit de moins de 100 litres par habitant, pour une popuation qui s'élevait déjà à plus d'un million d'âmes. Aujourd'hui, il dispose d'un ninimum de 213,000 mètres cubes d'eau par jour, et est en mesure d'en profiter ›ar les améliorations apportées à sa distribution intérieure. Il est vrai que sa ›opulation est de 1,600,000 habitants, ce qui ne fait encore ressortir qu'à 139 itres par habitant la quantité d'eau dont il jouit dès à présent; mais les travaux ;e poursuivent. Dans trois ou quatre ans, ce chiffre sera porté à 200 litres envi-·on par la dérivation des sources de la Vanne[1].

« L'administration municipale de Paris n'a rejeté aucune source d'alimentaion. Tout en allant rechercher des eaux de source pour les besoins du service ›rivé, à la suite des belles études hydrologiques du bassin de la Seine faites par .e savant directeur actuel des eaux et égouts de la ville, M. l'inspecteur général Belgrand, elle a installé, depuis 1862, de nouvelles pompes à feu sur la Seine, ;n amont de Paris, et une usine hydraulique sur la Marne, à Saint-Maur; elle ›erce deux nouveaux puits artésiens; elle augmente le débit du canal de l'Ourcq par l'installation de deux usines hydrauliques utilisant des chutes de la Marne, pour refouler de l'eau dans le canal pendant la saison des basses eaux.

L'aqueduc de dérivation des sources de la Dhuis, aqueduc souterrain de 130 kilomètres de longueur, construit dans des conditions qui lui permettront d'amener à Paris jusqu'à 50,000 mètres cubes d'eau pour vingt-quatre heures, n'offre rien de remarquable que la simplicité et les principes d'économie qui ont présidé à sa conception et à son exécution.

Les parties en conduite libre, qui présentent une pente uniforme de $0^m,10$ par kilomètre, sont formées d'un cylindre ovoïde de $1^m,76$ de hauteur sur $1^m,40$ de largeur, en maçonnerie de meulière brute et de ciment de 20 centimètres d'épaisseur, y compris un enduit intérieur en mortier de ciment de 2 centimètres. La forme circulaire eût été la plus rationnelle au point de vue de l'économie, nous la verrons généralement adoptée; mais la forme ovoïde donnait, dans ce cas particulier, une hauteur qui permet la visite facile de l'intérieur de l'aqueduc. Cette visite peut se faire, sans interrompre complétement le service, à l'aide de petits batelets et en abaissant seulement le plan d'eau normal. Les parties en conduite forcée ou siphons, à la traversée des vallées, qui présentent un développement total de 17 kilomètres environ, sont composées d'un cours de tuyaux en fonte d'un mètre de diamètre intérieur.

Tous les ouvrages d'art, les ponts sur les rivières et cours d'eau rencontrés, les regards espacés de 500 mètres en 500 mètres environ sur tout le parcours de la dérivation, les déversoirs, etc., sont traités dans ces mêmes principes de simplicité et d'économie; tous sont en maçonnerie brute.

Cette dérivation a coûté 16 millions 1/2, dans lesquels sont compris 2 millions 1/2 d'acquisitions de terrain, de sources et d'indemnité d'usines; en ad-

[1] Cette dérivation est aujourd'hui terminée.

mettant qu'on dépense encore successivement de 2 à 3 millions pour l'exécution des dérivations secondaires qui doivent compléter les 50,000 mètres cubes d'eau en vue desquelles elle est établie, le prix du mètre cube d'eau par 24 heures, fourni par cet ouvrage ressortira à 380 francs, c'est-à-dire que le prix d'un mètre cube ressortira à 0f,052.

L'usine hydraulique de Saint-Maur a été installée sur la Marne, près du confluent de cette rivière avec la Seine, en amont de Paris, afin d'utiliser la force hydraulique, résultant de la chute créée sur ce point par la coupure d'un circuit de la Marne, à élever de l'eau pour les services publics. Cette chute peut s'élever jusqu'à 4m,10 en basses eaux, et son volume est celui de la Marne même, c'est-à-dire qu'il est de 5 à 6 mètres cubes au plus bas étiage.

Indépendamment de sa large et belle disposition, cette usine est remarquable par les nouveaux moteurs hydrauliques qui y sont installés, c'est-à-dire par les *roues turbines* de M. Girard. Les turbines ou roues à axe vertical adoptées jusqu'ici, tout en utilisant beaucoup mieux que des roues de côté ou à axe horizontal la force hydraulique, lorsque celle-ci est représentée par une chute et un volume d'eau à peu près constant, perdent notablement de leurs avantages lorsqu'elles ont à tirer parti d'un volume d'eau variable, pour compenser les variations de la chute ; la roue-turbine de M. Girard, sorte de turbine à axe horizontal, tout en gardant les avantages de ces moteurs hydrauliques, n'en présente pas les inconvénients ; elle peut compenser, par le débit d'un plus grand volume d'eau, la diminution de la chute, et, si son rendement est toujours le meilleur à l'étiage, c'est-à-dire pour la plus grande chute, son effet utile reste le même, malgré une diminution considérable de la hauteur de la chute.

A Saint-Maur, M. Girard a installé quatre roues turbines, de 12 mètres de diamètre et de 120 chevaux chacune ; à l'étiage, c'est-à-dire avec une chute de 4m,10, elles ont donné un rendement de 64 pour 100 en eau montée; avec la diminution de la chute, leur rendement a diminué ; néanmoins, avec une chute réduite à 2 mètres, elles donnaient le même effet utile; enfin, la chute diminuant encore, elles marchaient lorsque les deux turbines du système Fourneyron, de 100 chevaux chacune, qui complètent l'ensemble de l'usine, étaient arrêtées. Par un système ingénieux de fermeture et d'ouverture des vannes de l'appareil distributeur, ces grandes roues s'arrêtent et se mettent en marche avec la facilité et la rapidité des machines à vapeur les plus sensibles. Elles ne reviennent toutes posées, en y comprenant les pompes qu'elles commandent, qu'à 500 francs par force de cheval.

Si l'on comprend dans les dépenses de création de cette usine l'acquisition des moulins sur l'emplacement desquels elle est installée, les indemnités y relatives, l'ouverture de la dérivation souterraine qui crée la chute en coupant le circuit de la Marne, enfin les conduites de refoulement allant aux réservoirs de distribution, les 40,000 mètres cubes qu'elle peut élever en moyenne, par vingt-quatre heures, reviennent à 7,600,000 francs, ce qui fait ressortir à 190 francs le prix du mètre cube d'eau par vingt-quatre heures, soit à 0f,026 le prix d'un mètre cube.

L'usine du quai d'Austerlitz, installée en 1864, nous montre enfin le type le plus récent des machines à vapeur et des pompes adoptées à Paris, pour l'élévation de l'eau destinée à l'alimentation d'une ville.

Cette usine, placée sur la rive gauche de la Seine, dans la partie amont de Paris, se compose de deux machines semblables, du système Woolf, d'une puissance de 120 chevaux sur l'arbre du volant à la vitesse de 18 tours par minute.

faisant marcher chacune deux pompes verticales de $0^m,10$ de diamètre, constituant un système à double effet. Ces pompes aspirent l'eau dans un puisard alimenté par un aqueduc de 120 mètres de longueur, qui va chercher au milieu de la Seine de l'eau toujours plus pure que celle des rives; cet aqueduc comprend ainsi 80 mètres de tuyaux en tôle de 0,80 de diamètre, immergés dans le lit de la Seine à 2 mètres en moyenne au-dessous de l'étiage. Les machines rendent jusqu'à 100 chevaux, en eau montée á 60 mètres de hauteur moyenne.

Elles peuvent donner, marchant ensemble, 22,000 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures. La dépense totale d'installation de l'usine, non compris les acquisitions de terrain a été de 710,000 francs; les machines seules ressortent à 1,430 francs environ par force de cheval.

Quant aux frais d'exploitation, ces machines travaillant continuellement vingt-quatre heures par jour, ils varient, par cheval utile en eau montée, de 900 à 1,000 francs par an. Le mètre cube d'eau ressort ainsi à $0^f,025$ ou à $0^f,033$ environ, en tenant compte de l'intérêt des dépenses de première installation. »

Eaux de la Dhuis. Réservoir de Ménilmontant. — Les eaux de la Dhuis, affluent du Surmelin, sont amenées par un aqueduc de 130 kilomètres de long, de 2 mètres de haut et de $1^m,40$ de large dans le réservoir de Ménilmontant, à $107^m,87$ au-dessus du niveau de la mer et à $81^m,62$ au-dessus de l'étiage de la Seine au pont de la Tournelle (fig. 2, pl. 14).

Ce réservoir est à deux étages :

L'étage supérieur est affecté aux eaux de la Dhuis, l'étage inférieur aux eaux de la Marne, refoulées par l'usine municipale de Saint-Maur.

L'étage supérieur contient 100,000 mètres cubes, lorsque la hauteur d'eau y est de 5 mètres, et l'étage inférieur contient 31,000 mètres cubes avec une hauteur variant, à cause de l'inclinaison du radier, de $1^m,50$ à $4^m,50$.

Dans les notices de l'Exposition de 1867, nous trouvons la description suivante des deux réservoirs :

« *Réservoir supérieur.* — En plan, ce réservoir affecte une forme demi-circulaire appuyée sur une partie rectangulaire. Le diamètre du cercle qui est de 188 mètres, forme le grand côté du rectangle dont l'autre dimension est de $42^m,50$.

Le réservoir est divisé en deux compartiments égaux et symétriques par un mur de refend, suivant le rayon qui est perpendiculaire au mur d'enceinte du côté de la rue de Vincennes.

Le réservoir est construit en déblai dans les marnes vertes.

Les fondations des murs de pourtour et du mur de refend traversent toute la couche de ces marnes; elles ont été descendues jusqu'au terrain gypseux, sur lequel elles reposent. En fondation, les murs de pourtour et de la partie du mur de refend qui n'est pas comprise dans le réservoir inférieur, sont évidés par des arcades.

Les murs de pourtour ont $1^m,40$ d'épaisseur en couronne. Le fruit intérieur est d'un cinquième pour les murs au-dessous du sol; pour les murs en déblai, le parement extérieur est vertical.

Les parements intérieurs sont verticaux, mais ils se raccordent avec le radier par un solin de 2 mètres de rayon.

Le mur de face du côté de la rue de Vincennes, qui est en partie en élévation, est épaulé par des terres en forme de talus.

Le radier est formé par un système de voûtes d'arêtes en plein cintre pour la partie qui recouvre le réservoir de la Marne, en arc de cercle pour les autres

parties du réservoir. L'intrados de ces dernières voûtes est appuyé sur les marnes. Ces voûtes ont 0m,40 d'épaisseur à la clef; elles sont supportées par des piliers qui sont espacés de 6 mètres d'axe en axe.

Le réservoir est couvert par une toiture formée de voûtes d'arêtes surbaissées au neuvième.

Les voûtes sont faites de deux rangs de briquettes, posées à plat avec mortier de ciment.

Elles reposent sur des piliers carrés ayant 0m,60 de côté à la retombée. Ces piliers sont montés à l'aplomb de ceux des fondations du radier.

Les voûtes en briquettes ont environ 0m,08 d'épaisseur, chape comprise. Elles sont recouvertes par une couche de terre gazonnée de 0m,40 d'épaisseur.

Les conduites de départ ont 1 mètre de diamètre; elles sont disposées de telle sorte que le service peut être fait isolément par chacun des compartiments ou par l'aqueduc.

La décharge permet de vider les eaux dans le réservoir des eaux de la Marne. Le tuyau de trop plein, dont l'orifice est placé à 5 mètres au-dessus du radier, dégorge également dans le réservoir inférieur.

Réservoir inférieur. — Le réservoir des eaux de la Marne est placé sous celui des eaux de la Dhuis ; il n'occupe que la partie centrale des soubassements de ce dernier.

Il a la forme d'un rectangle dont la grande dimension, parallèle au mur de façade, a 104 mètres de longueur sur 90 mètres de largeur dans l'œuvre.

Il est divisé en deux compartiments égaux et symétriques par le mur de refend dont il a été parlé au sujet du réservoir supérieur.

Chaque mur d'enceinte du réservoir est construit dans le milieu et suivant la direction d'une même travée des voûtes qui supportent le radier supérieur.

Ces murs ont 1m,20 d'épaisseur ; leur parement du côté des terres est vertical, à l'intérieur il est également vertical, mais il est raccordé avec le radier par un solin de 2 mètres de rayon.

Leur couronnement constitue une galerie qui permet de circuler librement autour des bassins.

Le radier suit la pente naturelle des marnes blanches du gypse; son épaisseur est de 0m,30.

Les piliers carrés qui supportent les voûtes, ont 1m,25 de côté à la naissance et 1m,75 à la base.

Les conduites de refoulement des pompes de Saint-Maur, déversent leurs eaux dans une bâche de répartition en communication avec les deux compartiments du réservoir.

La conduite de départ a 0m,80 de diamètre ; elle est disposée de telle sorte que le service peut être fait isolément par chaque compartiment.

Les maçonneries des radiers, les piliers des bassins inférieur et supérieur, les voûtes qui recouvrent le bassin inférieur sont construits en meulière.

Les murs de pourtour et d'enceinte sont en moellons avec revêtements en meulière.

Tous les parements intérieurs ont été rocaillés en mortier de ciment, avant de recevoir l'enduit en même mortier dont l'épaisseur est variable; elle est de 0m,025 au couronnement des murs et de 0m,035 à leur base et sur les radiers ;

Les réservoirs de Ménilmontant ont coûté 3,640,000 francs.

La capacité totale des réservoirs étant de 131,000 mètres cubes, le mètre cube de capacité revient à 27f,98. »

Eaux de la Vanne. — La Vanne est un affluent de l'Yonne; les sources de cette rivière sont recueillies et amenées à Paris par un aqueduc de 155 kilomètres de long, dont la dépense a été évaluée à 30 millions de francs.

L'aqueduc traverse les vallées de l'Yonne, du Loing à Moret, passe près de Fontainebleau, traverse la vallée de l'Essonne à Mennecy, puis la vallée de la Bièvre sur l'ancien aqueduc d'Arcueil et débouche dans les réservoirs de Montsouris.

Les renseignements nous font défaut sur cette importante construction; nous donnerons seulement les coupes en travers des principales sections de l'aqueduc, construit partie avec mortier de ciment *a*, *a*, partie avec mortier de chaux *b*, *b* figures 4 et 5, planche 14.

Pour la section intérieure, on a adopté la forme circulaire, la plus favorable, comme on sait, à l'écoulement, celle qui, pour un cube donné, a le moindre périmètre et, par suite, consomme le moindre volume de maçonnerie.

M. l'inspecteur général Belgrand publie en ce moment une description complète des Eaux de Paris, qui sont, pour ainsi dire, son œuvre propre; nous engageons le lecteur à vouloir bien se reporter à cet ouvrage. Dans un traité élémentaire comme le nôtre, nous ne pouvons aborder les détails de ces travaux exceptionnels.

Considérations générales sur les aqueducs de dérivation. — Lorsqu'il s'agit d'établir un aqueduc de dérivation, le point de départ est toujours donné et ne peut être changé; il en est presque toujours de même du point d'arrivée.

La pente par mètre ou la perte de charge est donc connue, et les formules de M. Bazin, rappelées dans notre *Hydraulique*, permettent de calculer la section que devra présenter l'aqueduc pour débiter le volume demandé.

Cependant, il arrive quelquefois qu'on jouit d'une certaine latitude pour l'emplacement du réservoir de distribution. Dans ce cas, il va sans dire qu'il ne faut pas le placer à un niveau beaucoup plus élevé qu'il n'est nécessaire, car on se trouverait entraîné à des augmentations de dépense pour la construction de l'aqueduc et l'établissement des conduites; mais il ne faut pas se borner non plus à l'altitude strictement nécessaire, car on se ménagerait alors des mécomptes pour l'avenir.

La vitesse d'écoulement dans un aqueduc de dérivation est proportionnelle à la racine carrée de la pente; c'est dire qu'il n'y a pas un grand intérêt à rechercher les pentes considérables.

Cependant, il faut que la pente soit assez forte pour imprimer à l'eau une certaine vitesse, afin que son voyage de la source au réservoir ne dure pas trop longtemps. Si l'eau n'avait qu'une vitesse de $0^m,10$, elle parcourrait 1 kilomètre en 10,000 secondes ou en deux heures quarante-six minutes; elle mettrait onze jours à parcourir un aqueduc de 100 kilomètres; elle perdrait pendant ce temps toutes ses qualités et pourrait même se corrompre.

Genieys prétendait que la vitesse ne devait jamais être inférieure à $0^m,35$. Cette limite est beaucoup trop élevée. On comprend, du reste, qu'elle dépend essentiellement de la longueur de l'aqueduc.

Les aqueducs ou rigoles en terre ne doivent être adoptés que pour des dérivations de grande importance, destinées à former en même temps des canaux de navigation; il est difficile de maintenir dans une rigole en terre, ou même dans une rigole en maçonnerie, les qualités de l'eau potable.

Les aqueducs de dérivation doivent être exécutés en maçonnerie et voûtés; il

faut les enfouir dans le sol ou les couvrir d'une chemise en maçonnerie suffisamment épaisse. On doit tendre le plus possible à se rapprocher de la section circulaire ; en tous cas, il faut supprimer les angles et les remplacer par des solins. Au passage des vallées on évitera les aqueducs en maçonnerie, généralement dispendieux, et on aura recours aux conduites forcées qui pourront être placées, au passage des cours d'eau, sur un pont-aqueduc de faible hauteur.

CHAPITRE V

DISTRIBUTIONS D'EAU PAR MACHINES ÉLÉVATOIRES

Considérations générales. — Il est rare de rencontrer à proximité d'une ville une source abondante ou une rivière qu'il soit possible de dériver par la pente naturelle du sol.

Le plus souvent, les eaux se trouvent en contre-bas de tout ou partie de la ville, et il est nécessaire de recourir à des machines élévatoires.

Dans notre *Traité des machines*, nous avons décrit les appareils qui servent à élever l'eau : bélier hydraulique, norias, chapelets, tympans, pompes.

Le bélier hydraulique peut rendre de sérieux services pour l'alimentation d'une propriété particulière, mais les chocs perpétuels, qui sont le principe même de l'appareil, en compromettent la durée, et il ne saurait être établi sous de fortes dimensions.

Les norias, chapelets et tympans ne servent que pour les irrigations et, en général, pour élever de grandes quantités d'eau à de faibles hauteurs.

Le seul appareil usuel, applicable à tous les cas, c'est la pompe aspirante et foulante : nous avons donné la théorie et la description des principaux systèmes de pompes, et nous ne pouvons revenir sur ce sujet; nous signalerons seulement les qualités à rechercher dans les pompes puissantes, destinées aux grandes distributions d'eau.

Les pompes, mues à bras d'hommes ou par un manége, ne peuvent convenir qu'à des exploitations industrielles, intermittentes. Les seuls moteurs à employer sont les moteurs hydrauliques ou les machines à vapeur.

Généralement, le moteur hydraulique, quelle que soit la dépense de premier établissement, est plus économique que la machine à vapeur; mais on n'a pas toujours des chutes à sa disposition.

Il va sans dire qu'on doit rechercher les appareils qui donnent le meilleur rendement; sur ce point encore, nous renverrons au *Traité des machines*.

Puissance de la machine. — La première chose à connaître, c'est la puissance qu'il convient de donner aux machines.

On doit élever un volume de V litres par seconde à une hauteur H, cela donne lieu à un travail VH; mais, la hauteur H doit être augmentée de la perte de charge (h) produite par le mouvement de l'eau dans une conduite de longueur et de diamètre connus, de sorte que le travail à produire est $V(H+h)$.

Les pompes elles-mêmes absorbent une partie du travail qui leur vient du

moteur; si $\left(\frac{m}{n}\right)$ est leur rendement, le travail à leur transmettre sera égal à

$$\frac{n}{m}\,\mathrm{V}\,(\mathrm{H}+h)$$

Enfin, le moteur lui-même absorbe une partie du travail qu'il reçoit; désignons son rendement par $\frac{m'}{n'}$, le travail à demander à la puissance motrice sera finalement égal à

$$\frac{n'}{m'}\cdot\frac{n}{m}\,\mathrm{V}\,(\mathrm{H}+h)$$

Ce travail est exprimé en kilogrammètres; on en aura la valeur en chevaux-vapeur en le divisant par 75.

Exemple : On doit élever 500 mètres cubes d'eau par 24 heures, à 30 mètres de hauteur, au moyen d'une conduite de 1,500 mètres de long, quelle devra être la puissance de la machine?

500 mètres cubes d'eau en 24 heures représentent 5 litres, 8 par seconde. Adoptons une conduite de $0^{m},162$ de diamètre, de $0^{m},081$ de rayon :

La section d'écoulement sera de.	$0^{mq},0206$
Le débit étant de..	$0^{mc},0058$
La vitesse moyenne u sera égale à.	$0^{m},28$

et la perte de charge, déduite de la formule $rj = b_1u^2$, dans laquelle on prend pour b_1 le nombre 0,001172, est égale à $0^{m},00113$ par mètre courant, soit, pour 1,500 mètres de conduite, une perte de charge totale de $1^{m},69$.

Le travail à produire, par seconde, sera donc $5,8\times31,69$, ou 184 kilogrammètres. Si le rendement des pompes est de 0,6, le travail transmis à leur arbre devra être de 306 kilogrammètres.

La puissance effective de la machine à vapeur devra atteindre, par conséquent, $\frac{806}{75}$, ou 4 chevaux-vapeur;

Et, si le rendement de la machine à vapeur est de $\frac{2}{3}$, sa force nominale devra être de six chevaux. Le rendement est plus voisin de 0,6 c'est-à-dire de $\frac{3}{5}$ que de $\frac{2}{3}$.

Réservoir d'air. — Chaque coup de piston de la pompe produit dans la colonne un mouvement ascensionnel, et le retour du piston détermine un arrêt brusque. De là, production de chocs qui ne tarderaient pas à être désastreux pour les appareils, vu la grandeur de la masse en mouvement; on peut régulariser le mouvement en montant sur le même arbre deux pompes, dont les bielles sont calées à angle droit ou trois pompes avec bielles calées à 120° (voir le *Cours de machines*); mais, ces précautions ne suffisent pas, et il est indispensable de placer à la base de la conduite ascendante un réservoir d'air comprimé, qui sert de régulateur et qui, à chaque instant, emmagasine l'excès de travail ou comble le déficit, de manière à maintenir le mouvement uniforme de l'eau dans la conduite.

Ce réservoir d'air comprimé est une grande cloche en fonte; on l'alimente

par une pompe à air, montée sur l'arbre des pompes à eau ; l'alimentation continue est nécessaire, car l'air est sans cesse entraîné et dissous par le courant liquide.

Pour éviter l'effet pernicieux des chocs, il faut réduire le plus possible la force vive de la masse en mouvement, c'est-à-dire qu'il faut tendre à diminuer la vitesse moyenne de l'eau dans la conduite ; on y arrive en adoptant d'assez forts diamètres. Cependant, avec un bon réservoir à air, les grands diamètres ne sont pas aussi nécessaires.

Nécessité d'un double système dans une grande ville. — Les moteurs et les pompes doivent, à des intervalles plus ou moins éloignés, être mis en chômage pour être visités, réparés et nettoyés. En dehors de ces circonstances, un accident peut survenir qui interrompe le fonctionnement des appareils.

Or, un service de distribution d'eau ne peut chômer, car, lorsqu'il a été établi depuis quelque temps dans une ville, il ne reste plus rien pour le remplacer.

Donc il est indispensable d'avoir double moteur, double système de pompes; une double conduite est moins nécessaire.

C'est un point qu'il convient de ne pas perdre de vue, notamment dans les grandes villes; pour des distributions secondaires, la condition principale d'établissement est, en général, l'économie ; on pourra donc se contenter d'abord d'un moteur unique et d'une conduite unique; en somme, les réparations ne sont jamais bien longues ni bien difficiles, et, presque toujours, l'ennui d'un léger chômage éventuel ne saurait être comparé aux charges résultant d'un grand excès de dépense.

1° EAUX DE TOULOUSE.

Le créateur des fontaines de Toulouse est d'Aubuisson, qui en a rendu compte dans un excellent mémoire que nous allons résumer ici.

La quantité d'eau nécessaire avait été fixée à 200 pouces d'eau, soit environ 80 litres par tête. A la suite d'un concours, on décida de recourir aux machines élévatoires et de prendre l'eau de la Garonne, filtrée naturellement dans les sables des rives. Nous avons décrit ce filtrage naturel à la page 86, et les aqueducs de captation sont représentés par les figures 5 et 6 de la planche 2.

La figure 3 de la planche 8 représente la coupe en travers de l'édifice qui renferme les roues hydrauliques motrices et les pompes, et qui est surmonté d'une tour ou château d'eau.

On voit à la base de l'édifice, de chaque côté, deux roues à palettes dont le squelette était en fer et fonte et les aubes en bois ; ces roues sont mises en mouvement par une dérivation de la Garonne.

Chacune d'elles fait mouvoir quatre pompes à piston-plongeur, deux de chaque côté ; les eaux sont refoulées par chaque moteur dans deux tuyaux qui se réunissent, à une certaine hauteur, dans une conduite verticale unique, laquelle verse ses eaux dans la cuvette en fonte surmontant le château d'eau, fig. 4.

Ce château d'eau est situé sur la rive gauche de la Garonne ; de sa cuvette partent deux conduites, indiquées par la coupe en travers, qui passent sous le pont de la Garonne et se rendent vers le milieu de la ville dans une cuve de distribution ; de chaque côté de cette cuve partent deux conduites : le premier groupe

des deux conduites alimente le réservoir de la place des Carmes; le second groupe alimente le réservoir de la place Royale. — Les deux places ainsi désignées sont les deux centres de la ville; chaque réservoir alimente la zone qui lui correspond.

En établissant double conduite sur les grandes artères, d'Aubuisson a voulu parer à toutes les éventualités de chômage; le double moteur s'explique par la même raison.

L'établissement de la distribution d'eau de Toulouse a entraîné une dépense totale de 1,161,943 francs.

Inutilité du château d'eau. — Le château d'eau avait pour but de réduire, dans une proportion considérable, la masse du liquide à mettre en mouvement à chaque coup de piston.

On évitait ainsi les chocs violents, et c'était une bonne précaution, vu l'absence de réservoir d'air comprimé.

Aujourd'hui, on établirait à la base des conduites de refoulement un réservoir d'air comprimé, on supprimerait le château d'eau et on enverrait directement les eaux aux deux bassins de la place Royale et de la place des Carmes, au lieu de les monter d'abord à la hauteur voulue pour les laisser descendre ensuite sous l'action de la pesanteur.

2° EAUX DE MARLY ET DE VERSAILLES [1].

Sous Louis XIII, Versailles était alimenté par des eaux élevées de la Bièvre et de l'étang de Clagny. — En 1662, Louis XIV fit installer des pompes plus puissantes dans une tour octogone, au sommet de laquelle était un réservoir; les pompes élevaient l'eau de l'étang de Clagny, et du réservoir elle se rendait aux fontaines du jardin.

Mais il fallut bientôt songer à se créer de plus sérieuses ressources : Riquet proposa de dériver la Loire, mais il eût fallu aller la chercher à la Charité, et encore l'altitude des plateaux de la Beauce eût-elle été trop faible. — On projeta aussi une dérivation de la Seine, dérivation impossible.

Cependant un nivellement précis démontra qu'à l'ouest de Versailles s'étendait un vaste plateau argileux présentant, à Trappes et à Bois-d'Arcy, deux dépressions dont le fond était à 7 ou 8 mètres au-dessus du réservoir de la tour dont nous avons parlé tout à l'heure. Ces dépressions furent transformées en étangs : on y fit arriver de nombreuses rigoles d'alimentation et, par un aqueduc spécial, on en amena les eaux jusqu'à Versailles, où elles arrivèrent en 1675.

Les eaux des étangs portent le nom d'eaux blanches, à cause de la couleur blanchâtre qu'elles conservent; elles sont impropres aux usages domestiques, on les réserve pour les pièces d'eau.

Pour l'alimentation, on conserva les eaux de source, auxquelles on ajouta celles de Roquencourt.

En 1675, Colbert fit installer, par le baron Deville et le charpentier Rennequin,

[1] Voir le mémoire intitulé : *Études sur les eaux de Marly et de Versailles*, par M. Vallès, inspecteur général des ponts et chaussées, mémoire inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1864.

la machine de Marly qui, d'abord destinée à alimenter seulement le parc de Marly, ne tarda pas à envoyer à Versailles la plus grande partie de ses eaux.

Le système de Marly comprenait :

1° Un barrage réunissant les diverses îles de la Seine et créant une chûte;

2° 14 roues hydrauliques de 12 mètres de diamètre;

3° 221 pompes aspirantes et foulantes, étagées à flanc de côteau.

En bas, 64 pompes élevatoires envoyaient, par 5 conduites de $0^m,221$ de diamètre, les eaux dans des puisards placés à 50 mètres au-dessus de la Seine; 79 pompes les reprenaient et les portaient à $50^m,75$ plus haut; enfin, un 3e étage de 78 pompes les reprenaient encore et les envoyaient définitivement à $154^m,70$ au-dessus du niveau de la Seine, au sommet du long aqueduc de Marly, monument dont l'utilité ne se comprend guère aujourd'hui. — L'espace parcouru en plan était de 1,256 mètres.

On connaît le système de renvois de mouvement : nous l'avons décrit en mécanique; il est connu sous le nom de système de tiges et de varlets. Les varlets, fixés au sol et oscillant autour de leur point d'appui, s'articulent avec les tiges contiguës et les soutiennent; tout le système est animé par l'arbre des pompes d'un mouvement de va-et-vient qui ne tarde pas à produire un énorme ferraillement et à mettre les pièces hors d'usage.

L'aqueduc amenait les eaux à Versailles, au réservoir de la Butte-de-Picardie, d'où elles passaient, par un aqueduc aérien, dans le réservoir de Montbauron; aujourd'hui l'aqueduc aérien a disparu et est remplacé par une conduite forcée.

Le volume donné par la machine de Marly était primitivement de 250 pouces fontainiers; il se réduisit en peu de temps à 60 pouces ou 1,130 mètres cubes par jour.

En 1684, on commença la dérivation de l'Eure, qu'on prenait à Pont-Gouin, à 7 ou 8 lieues au delà de Chartres. 30,000 hommes furent employés aux travaux et creusèrent, jusqu'à Berchère-le-Mangot, un canal de 5 mètres de large et de 3 mètres de profondeur sur 40 kilomètres de long. Les mouvements de terre humide produisirent leur effet habituel et engendrèrent des maladies qui se propagèrent facilement dans une aussi grosse agglomération d'ouvriers. — Les travaux furent abandonnés en 1687, sous le coup des embarras de tout genre que suscitait la ligue d'Augsbourg.

En 1680, on avait amené, par l'aqueduc de Buc jusqu'aux réservoirs Gobert, les eaux de l'étang de Saclay, qui arrivaient à 13 mètres au-dessus du réservoir de Montbauron.

Au dix-huitième siècle, l'état des choses ne se modifia guère, et, en 1803, la machine de Marly n'élevait plus que 12 pouces d'eau par jour.

En 1804, le charpentier Brunet mit en mouvement, au moyen de la 14e roue hydraulique, une pompe qui élevait l'eau d'un seul jet de la Seine à l'aqueduc de Marly, et qui, seule, donnait 10 pouces d'eau par jour.

Mais le système Brunet ne fut pas généralisé d'abord; on préféra une machine à vapeur, qui ne fut définitivement installée qu'en 1826. — En 1817, on avait adapté à deux des roues hydrauliques des pompes du système Brunet.

En 1852, l'établissement comprenait : 2 roues de 12 mètres, actionnant des pompes et élevant 850 mètres cubes par jour; une machine à vapeur fonctionnant d'une manière intermittente, et pouvant élever 1,800 mètres cubes en 24 heures.

Le prix de revient de l'eau fournie par la machine à vapeur était d'au moins

0fr,23, tandis qu'on pouvait réduire ce prix à 0fr,037 en faisant usage des moteurs hydrauliques.

On résolut donc, sur l'avis d'une commission spéciale, d'installer trois moteurs hydrauliques : on avait d'abord songé aux turbines; mais les turbines ne fonctionnent bien qu'avec une vitesse notable; or, dans le cas actuel, il s'agit d'élever de l'eau d'un seul jet à une hauteur de 150 mètres; la pression à exercer sur le piston des pompes est donc supérieure à 15 atmosphères; pour éviter les chocs il faut une marche modérée; il convient donc de recourir à un moteur à mouvement lent. Ce sont les grandes roues de côté qui remplissent le mieux ces conditions et qui permettent d'actionner directement les pompes sans l'intermédiaire d'engrenages.

Depuis 1856, le volume emprunté à Marly a sans cesse augmenté, bien qu'on ait conservé les étangs, qui n'ont pas été rendus à la culture, ainsi que quelques personnes le demandaient. Toutes les idées, dit M. Vallès, sont en effet portées vers la nécessité de donner un plus grand développement à la distribution d'eau dans les villes. A l'est comme à l'ouest de Versailles, il existe deux rûs, réceptacle naturel des égouts de la cité, et l'on aura peine à comprendre que tant d'impuretés puissent subsister de nos jours; on sera du moins édifié sur la nécessité d'un prompt remède. « Car, non-seulement les eaux infectées empoisonnent l'air par leurs miasmes corrompus, mais elles affectent gravement l'hygiène du corps, parce que, faute d'autres ressources, on lave beaucoup de linge dans ce liquide, quelqu'impur qu'il soit. »

En 1868, la consommation de Versailles a été de 8,000 mètres cubes par jour. — Le volume nécessaire au jeu des grandes eaux est chaque fois de 7,000 mètres cubes.

La figure 1,2, de la planche 8, représente le profil en long des conduites ascensionnelles depuis la Seine jusqu'au réservoir des Deux-Portes, situé près de l'aqueduc de Marly; les eaux arrivant à l'origine de cet aqueduc le suivent en coulant dans une cuvette en plomb de 603 mètres de long et de 0m,00015 de pente; arrivées à l'extrémité, elles descendent par une conduite souterraine et siphonnent pour gagner le réservoir. Cette disposition est très-vicieuse, car la charge du siphon est trop faible et il s'engorge : l'aqueduc de Marly est un monument inutile.

La machine à vapeur de 64 chevaux a été conservée comme renfort; c'était, en 1826, un appareil remarquable; il est très-mauvais aujourd'hui, puisqu'il consomme 7 kilogrammes de charbon par cheval et par heure.

Nous donnons, d'après le *Mémoire* de M. Vallès, deux coupes en travers des moteurs hydrauliques et des pompes, avec le détail des appareils, planche 8, figures 5 à 10 :

p, aubes planes au nombre de 64, constituant une des 4 roues de 12 mètres de diamètre et de 4m,50 d'épaisseur; ces aubes en bon bois d'orme sont assemblées entre elles et fixées, par des équerres en fer, à deux rangées *ee'* de couronnes concentriques en fer;

b, boulons qui réunissent les aubes à la circonférence extérieure et aux deux bouts ;

E, bras en bois sur lesquels sont boulonnées les couronnes *ee'* ;

D, tourteau en fonte dans lequel s'assemblent les bras E;

A, arbre de transmission en fer forgé ;

B, paliers en fonte;

C, plaque de fondation en fonte.

Chaque roue actionne de chaque côté deux pompes horizontales, à piston plongeur, à simple effet, fig. 7 et 8 :

H, cylindre en fonte de la roue, de $0^m,45$ de diamètre extérieur, alésé intérieurement à $0^m,39$; de chaque côté ce cylindre porte des empâtements I venus de fonte, qui servent à le fixer au bâti I', boulonné sur la plaque de fondation ;

K, piston plongeur avec son stuffing box h' ;

L, chape en tête du piston traversée par un petit arbre en fer forgé L', garni à ses extrémités de coulisseaux en bronze l, se mouvant horizontalement sur les glissières en fonte l, fig. 9;

Sur l'arbre L' vient s'attacher la bielle a', actionnée par une manivelle montée sur l'arbre de la roue ; il y a donc deux manivelles à chaque extrémité de l'arbre A ;

k, fond du piston plongeur, rapporté et ajusté après le moulage ;

H' boîte à deux tubulures, venue de fonte avec le cylindre ;

h^2, bride en fonte fixant le tuyau d'aspiration M;

N, siége du clapet O, tous deux en bronze;

n, rondelle de bois d'orme debout, appuyée sur la gorge circulaire du siége ;

n', butoirs servant de limite à l'ascension du clapet;

Q et Q', clapets de refoulement avec charnières p ; ces clapets en bronze s'appuient sur le double siége incliné en bronze, R ;

S, regard permettant la visite des clapets ;

Après la boîte P, qui contient les clapets de refoulement, est placé un robinet vanne P', qui permet d'interrompre la communication d'une pompe avec l'une des conduites collectives U,U';

Ces conduites sont sur la longueur du bâtiment, sous une plateforme en fonte U^2; elles communiquent avec deux grands réservoirs en fonte VV', à air comprimé;

Sur le couvercle H^2 de la boîte des clapets d'aspiration, est fixé l'appareil à comprimer l'air o, qui se compose de : figure 10;

o, petite cloche en fonte avec robinet o' ;

r, disque en cuir recouvrant la bride supérieure du robinet, laquelle est percée de petits trous ;

s, petit tube qui, à chaque mouvement en arrière du piston, laisse entrer l'air extérieur aspiré en même temps que l'eau par le tube M, fig. 7 ;

Quand le piston revient en avant, l'air refoulé soulève la plaque de cuir r et pénètre dans le cylindre o ;

L'air comprimé à 16 ou 17 atmosphères s'en va par le tuyau t dans le tuyau collecteur t' qui le conduit à un des réservoirs V ;

De l'eau est aspirée en même temps que l'air, sa présence est accusée par le tube indicateur o'', qui porte un robinet purgeur servant à l'évacuation.

Les canaux d'alimentation où plongent les tuyaux d'aspiration M, sont fermés à l'aval par une vanne m' afin de ne point laisser échapper le courant du fleuve ;

m_2, grille en aval du canal d'alimentation ;

G', vannes de prise d'eau en forte tôle, manœuvrées par un treuil, dont F est le bâti, et f l'arbre à manivelle ; cet arbre porte un pignon qui commande une roue dentée, montée sur un second arbre du bâti ; le pignon de ce second arbre commande la roue G, dont l'arbre porte, à ses extrémités, deux pignons engrenant avec les crémaillères h de la vanne ;

G^2, grillage s'opposant au passage des matières solides;

Des expériences, faites à la vitesse moyenne de 2 tours 1/2 des roues hydrau-

liques, par minute, ont donné pour l'ensemble des 3 roues fonctionnant, 80 litres 1/4 par seconde, soit 6,940 mètres cubes par jour;

Le rendement de la machine, en calculant le travail de la chute, était de 51 p. 100; c'est un résultat satisfaisant.

3° EAUX DE LYON [1].

Les eaux de Lyon proviennent d'une galerie de filtration creusée dans la plaine du petit Broteau, sur la rive droite du Rhône, à l'amont de Lyon. On en trouvera la description page 87.

La plaine du petit Broteau est à 5 ou 6 mètres au-dessus de l'étiage, donc facile à mettre à l'abri des crues; le sous-sol est composé d'une masse de sables et graviers purs et perméables, fournissant une bonne eau potable.

La galerie de filtration de 120 mètres de long et de 5 mètres de large, doit être complétée par deux bassins filtrants.

Les eaux sont réunies dans un puisard commun d'où elles sont extraites par trois machines à vapeur, ayant chacune une puissance de 170 chevaux.

On peut subdiviser le service en trois services distincts :

1° Le *bas service*, qui comprend la plus grande partie de la ville et qui est alimenté par un réservoir de 10,000 mètres cubes de capacité placé sur le coteau, immédiatement au-dessus de l'usine hydraulique; les eaux sont refoulées à ce réservoir par une conduite de 0^m92 de diamètre. Le réservoir communique par une conduite de $0^m,60$ de diamètre, avec un réservoir de 4,000 mètres cubes, construit dans l'intérieur de la ville, à l'emplacement de l'ancien Jardin des plantes, et destiné à satisfaire aux nécessités de l'arrosage public; ce réservoir a pour effet, comme nous l'a enseigné la théorie, d'augmenter considérablement la puissance de la distribution;

2° Le *moyen service*, qui est alimenté par un réservoir de 4,000 mètres cubes, placé au sommet du coteau de Montessuy; il reçoit les eaux par une conduite de $0^m,60$ de diamètre;

3° Le *haut service*, destiné à atteindre les hauteurs de Fourvières; les eaux du moyen service sont reprises au réservoir de Montessuy, et refoulées par une machine à vapeur, au sommet d'une colonne en fonte de 55 mètres de hauteur : cette colonne est surmontée d'un réservoir en tôle d'où les eaux s'échappent par une conduite qui descend des hauteurs de la Croix-Rousse, sur le pont de Nemours, pour remonter en siphon renversé sous une pression de plus de 13 atmosphères sur le coteau de Fourvières. Là, elles s'épanchent dans un réservoir de 1,000 mètres cubes de capacité.

Les quatre réservoirs précités alimentent un réseau de conduites de 90 kilomètres de long, dont les diamètres varient de $0^m,60$ à $0^m,081$.

Le système a été complété par la création de 20 kilomètres d'égouts.

[1] *Les eaux de Lyon et de Paris*, par A. Dumont, ingénieur des ponts et chaussées, 1 volum avec atlas, chez Dunod, éditeur. M. Dumont a constamment et énergiquement défendu le système de l'élévation des eaux de rivière, clarifiées par des filtres naturels ou artificiels.

La dépense totale s'est élevée à	8,884,157f 18
Dans laquelle somme il faut compter :	
La canalisation et ses dépendances, bouches, bornes fontaines, etc. pour soit 32 francs par mètre courant.	2,884,592
Les égouts pour 80 francs par mètre courant.	1,616,800
L'usine, ses dépendances et son atelier pour	500,000
Les machines à vapeur et appareils supplémentaires pour	707,238
Le réservoir du moyen service pour soit 32 fr. 20 par mètre cube.	193,224
Le réservoir du Jardin des plantes pour soit 52 francs par mètre cube.	207,702
Le système filtrant pour	500,000

Système des machines. — Les machines sont du système de Cornouailles, à détente et à condensation, chacune de la force de 170 chevaux.

Leur marche normale est de huit coups de piston à la minute; ce nombre peut, sans inconvénient, être porté à dix ou réduit à six.

Elles font mouvoir des pompes aspirantes et foulantes à simple effet. Le piston de la pompe du bas service a 1 mètre de diamètre et $2^m,50$ de course; son débit théorique est de $2^m,17$ par coup de piston et son débit réel $1^m,80$.

Le piston de la pompe du moyen service a $0^m,60$ de diamètre et $2^m,50$ de course. Le débit théorique est de $0^m,70$ et le débit réel de $0^m,60$.

Les eaux refoulées passent au pied de réservoirs à air de 2 mètres de diamètre et de 15 mètres de hauteur.

Nous renverrons à notre *Traité des machines à vapeur*, pour la description des machines de Cornouailles, système de Woolf, à détente et à condensation.

Ces machines perfectionnées peuvent arriver à ne consommer qu'un kilogramme de bonne houille par cheval et par heure, ce qui représente 270 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur.

Les pompes sont placées à $9^m,20$ au-dessus de l'étiage du Rhône;

Le réservoir du bas service est à la cote	45,70
Le réservoir du Jardin des plantes	34,10
Le réservoir du service moyen	87,92

Colonne en fonte de Montessuy. — La colonne en fonte de Montessuy a une hauteur de 55 mètres, depuis le dessus du soubassement en maçonnerie qui la supporte jusqu'au fond du réservoir en tôle qui la surmonte.

Cette colonne est analogue aux grandes piles des viaducs métalliques; elle est formée d'un faisceau pyramidal de montants en fonte, entretoisés et contreventés par des croix de Saint-André, en fer forgé.

Elle pèse 60 tonnes : 44 tonnes de fonte, 13 de fer et 3 de tôle; elle a coûté, mise en place, 40,000 francs.

Au milieu de la colonne se trouvent deux conduites : l'une montante, de $0^m,60$ de diamètre, conduit au réservoir en tôle du sommet l'eau refoulée par la machine établie au pied de la colonne. L'autre conduite, de $0^m,40$ de diamètre, reçoit l'eau descendante qui s'engage dans le siphon renversé, la conduisant au réservoir de la Sarra sur les hauteurs de Fourvières.

Un escalier en spirale, entièrement métallique, entoure la grosse conduite de $0^m,60$ et permet de monter jusqu'au sommet du réservoir en tôle.

4° EAUX DE NIMES [1].

Sous les Romains, Nîmes était alimenté par une dérivation des sources d'Eure, amenées dans la ville par l'aqueduc qui traversait la vallée du Gardon sur le célèbre pont du Gard, détérioré par les Vandales. Le pont du Gard est représenté par les figures 1 et 3 de la planche 7.

Jusqu'à ces derniers temps, Nîmes ne disposait plus que des eaux de la fontaine de Nemausa, dont le volume descendait en été à 800 mètres cubes par jour pour une population de 60,000 habitants. Les souffrances étaient grandes et depuis longtemps on cherchait un remède.

Ancien aqueduc romain. — En remontant de Nimes au pont du Gard, cet aqueduc avait 33,426 mètres avec une pente moyenne de $0^m,18$ par kilomètre, pente variant entre $0^m,07$ et $0^m,45$.

Le profil type paraît avoir été fixé à $1^m,20$ de largeur et $1^m,80$ de hauteur sous clef; l'enduit s'élevait à $1^m,15$ au-dessus du radier.

L'aqueduc était généralement enfoui à une profondeur quelquefois considérable. Il aboutissait au pont du Gard, formé de trois étages d'arcades superposées, ayant une hauteur totale de $48^m,77$ et une longueur au sommet de 269 mètres.

En amont du pont du Gard, l'aqueduc allait jusqu'aux sources d'Eure à 41 kilomètres de là, tantôt à ciel ouvert, tantôt enfoui dans le sol.

Il n'était plus possible de songer à dériver maintenant à nouveau les sources d'Eure, situées près de la ville d'Uzès; elles sont pour cette ville et ses environs un véritable trésor dont on ne saurait les dépouiller.

Projets divers. Dérivation et élévation des eaux du Gardon. — En 1780, on proposa la restauration de l'aqueduc romain, mais on n'osa point soutenir le projet.

Vers 1830, MM. Didion et Talabot, proposèrent d'exécuter un canal de dérivation du Gardon, latéral au chemin de fer d'Alais.

En 1839, M. l'inspecteur général des ponts et chaussées Perrier présenta un nouveau projet de dérivation des eaux du Gardon, par une rigole de 30,772 mètres de longueur dont 8,072 en deux souterrains ; la longueur d'un de ces souterrains atteignait 6,435 mètres. Ce projet échoua par l'opposition des usiniers et riverains du Gardon.

En 1844, un concours fut institué et divers projets furent examinés ; MM. Surell et Mourier barraient le Gardon au moulin Lafoux, y créaient des moteurs hydrauliques avec lesquels ils refoulaient une partie des eaux jusqu'au sommet d'un plateau, d'où elles se rendaient à Nimes par un aqueduc de $0^m,80$ de large sur $0^m,90$ de hauteur.

M. Dombre proposait de se servir de l'ancien aqueduc Romain, entre le pont du Gard et Nîmes, en élevant les eaux au moyen d'une machine à vapeur.

Plusieurs autres personnes présentèrent des projets plus ou moins analogues aux précédents.

[1] *Les eaux de Nimes, de Paris et de Londres*, par Aristide Dumont, ingénieur en chef des ponts et chaussées, 1 volume avec atlas, chez Dunod, éditeur.

En 1852, un nouveau concours fut institué, qui ne fit surgir que des projets incomplets et ne réussit pas mieux que le Concours de 1844.

En 1862, se forma la Compagnie des eaux du Midi, ayant pour but de créer une dérivation du Rhône, destinée à l'irrigation des terres et à l'alimentation des villes.

Cette Compagnie des eaux du Midi disparut, et c'est alors que M. Dumont se présenta demandant à établir des machines à vapeur à la Roche-de-Comps et à envoyer à Nîmes les eaux du Rhône, préalablement clarifiées par un filtrage naturel.

Description sommaire du projet exécuté. — « Le projet consiste essentiellement, dit le rapport de MM. les ingénieurs Salva et Lenthéric, dans l'établissement de machines à vapeur à la Roche-de-Comps sur la rive droite du Rhône, un peu en aval de l'embouchure du Gardon.

Ces machines sont destinées à faire mouvoir des pompes qui puiseront l'eau du Rhône, dans une galerie de filtration de 500 mètres de développement, de $10^{m},20$ de largeur dans œuvre et parallèle à la rive du Rhône. Les eaux seront refoulées sur une longueur de 9,661 mètres, jusqu'à la métairie Pagès, à la cote de $63^{m},12$ au-dessus du niveau de la mer.

En ce point, le tuyau de refoulement les déversera dans l'aqueduc voûté, commencé par la Compagnie des eaux du Midi, lequel sera achevé et mis en parfait état, entre la métairie Pagès et le mas Louis (extrémité de l'enclos Gasquet au valat Riquet) sur une longueur de 14,025 mètres.

Cet aqueduc ayant une section considérable ($3^{m},20$ de largeur sur 2 mètres de hauteur sous clef) et ayant en outre l'avantage d'être, sur la presque totalité de son parcours, recouvert d'une couche de terre et de déblais provenant des fouilles, sera utilisé comme réservoir.

A son extrémité, les eaux dégorgeront dans une conduite qui traversera, en siphon renversé, la route nationale n° 87 de Lyon à Béziers, entrera dans la ville par l'ancien chemin d'Avignon, et se prolongera jusqu'à l'Esplanade sur une longueur de 2,300 mètres environ, en passant par la rue Notre-Dame et la place de la Couronne.

Cette conduite maîtresse, alimentée par l'aqueduc-réservoir, se rattachera à une conduite annulaire faisant le tour des boulevards, et qui formera l'artère principale de la distribution intérieure, dont les détails importent peu et n'offrent d'ailleurs rien de particulier.

Les dispositions principales du projet sont donc :

1° Une galerie de filtration de 500 mètres de développement à établir dans les bancs de gravier du Rhône, en aval de la Roche de Comps ;

2° L'établissement de machines à vapeur et de pompes élévatoires ;

3° Une conduite de refoulement de 9,661 mètres, amenant les eaux à la métairie Pagès, dans l'aqueduc-réservoir en partie exécuté par la Compagnie des eaux du Midi ;

4° L'achèvement des travaux de cet aqueduc-réservoir, sur une longueur de 14,025 mètres.

5° La pose d'une conduite en siphon renversé sur 2,300 mètres, amenant les eaux à l'Esplanade.

6° La canalisation intérieure de la ville comprenant : bornes-fontaines, bouches sous trottoirs, etc.

La galerie de filtration, le diamètre des conduites, la force des machines sont calculés de manière à pouvoir élever 40,000 mètres cubes par jour d'eau fil-

trée, et le montant total des travaux doit s'élever au chiffre de 3 millions de francs.

La longueur du tracé est de.	25,986	mètres.
ainsi décomposée :		
De l'usine hydraulique de Comps à la métairie Pagès, conduite de refoulement.	9,661	—
De la métairie Pagès au mas Louis, aqueduc-réservoir.	14,025	—
Du mas Louis à l'Esplanade.	2,300	—
Total.	25,986	—

Justification de cette solution. — Clarification des eaux du Rhône au moyen de la galerie de filtration. — La distance qui sépare la roche de Comps de Nîmes est, en ligne droite (à vol d'oiseau) de 20,000 mètres environ. La longueur du tracé, en refoulant les eaux jusqu'à la métairie Pagès, et en utilisant, à partir de ce point, l'aqueduc-réservoir en partie exécuté, n'est que de 25,986 mètres.

Il est difficile de trouver un parcours plus direct, et l'allongement, d'ailleurs peu considérable, de 5 à 6 kilomètres, se justifie par la convenance d'utiliser, sur la plus grande longueur possible, l'aqueduc-réservoir commencé par la Compagnie des eaux du Midi, et de suivre, pour atteindre cet aqueduc, la route nationale n° 86 et le chemin vicinal de grande communication de Meynes à Montfrin, sans qu'il soit besoin, pour la pose des conduites sous le sol de ces deux routes, de faire aucune acquisition ni expropriation de terrains. »

Machines employées. — La galerie filtrante a été décrite à la page 88; nous donnerons seulement quelques renseignements sur les machines.

On avait projeté d'abord des machines de Cornouailles, analogues à celles de Lyon : capables d'élever chacune 1,200 mètres cubes d'eau par heure à une hauteur de $66^{m},50$.

Les deux machines prévues devaient être installées par le Creusot moyennant une somme de 835,000 francs, et le Creusot garantissait que la consommation en charbon ne dépasserait pas $1^{k},70$ par cheval et par heure.

On chercha un système plus économique qui fut adopté : il consiste en trois machines à action directe, dans lesquelles le diamètre du piston à vapeur est de $1^{m},47$ et le diamètre du piston des pompes à double effet est de $0^{m},62$; la course commune des pistons est de $1^{m},30$. Le nombre de tours de ces machines était fixé à 12 par minute.

Les trois machines posées devaient coûter 365,000 francs.

Ce système a été adopté comme le moins coûteux et le plus maniable et se prêtant le mieux aux exigences d'une exploitation progressive.

La conduite de refoulement de 9,661 mètres de long est en fonte, avec un diamètre intérieur de $0^{m},80$. Elle est soumise à sa base à une pression de près de 7 atmosphères.

Conduite en ciment. — Une partie de la conduite d'alimentation sur 9 kilomètres, à partir du réservoir Pagès, est en ciment : elle présente aussi un diamètre intérieur de $0^{m},80$ et une épaisseur variable suivant les pressions supportées.

Les conduites en ciment d'un fort diamètre ne présentent sur la fonte d'avantages sérieux, d'économie et de sécurité que lorsqu'on les emploie sous de

faibles charges ne dépassant pas 10 à 15 mètres. Aussi, ne les a-t-on employées à Nîmes que sur une section où la pression ne dépassait pas 12 mètres.

L'épaisseur E de la conduite en ciment, était calculée par la formule :

$$E = \frac{D.H}{30}$$

dans laquelle D est le diamètre et H la pression en mètres.

Le béton de ciment était composé par mètre cube de

500 kilogrammes de ciment de la porte de France à Grenoble.
500 litres de sable.
500 litres de gravier.

Les tuyaux de 0,80 de diamètre, mis en place, étaient payés 50 francs le mètre courant, tout compris.

Prix de revient du mètre cube. — Le prix de revient du mètre cube d'eau y compris intérêt, personnel, entretien et amortissement des machines sera de 0f,05 1/4.

La fourniture journalière d'un mètre cube coûtera donc à la ville 20f,95 par an.

Le prix prévu par les actes de concession est de 0f,40 le mètre cube pour les usages domestiques et 0f,20 pour les usages industriels.

5° EAUX D'ORLÉANS.

En face d'Orléans, sur la rive gauche de la Loire, entre ce fleuve et le Loiret, s'étend une plaine qui recouvre une nappe d'eau puissante en communication avec le fleuve ; c'est cette nappe qui alimente les sources du Loiret.

Elle donne une eau naturellement filtrée par son voyage souterrain. Cette eau a les qualités d'une eau potable, et ne renferme que 0gr,105 de matières solides par litre.

Sa température est peu variable et se maintient entre 10° et 15°.

La prise d'eau se compose d'une série de puits verticaux, mis en communication par des galeries, afin de développer la surface de filtration. Pendant les crues de la Loire, les eaux prennent néanmoins une légère teinte louche.

L'aspiration se fait par un tuyau de 0m,50 qui se bifurque en deux branches alimentant chacune une machine.

Chaque pompe de refoulement envoie les eaux dans une conduite de 0m,35 de diamètre, et les deux conduites se réunissent au delà des réservoirs à air comprimé en une seule de même diamètre qui donne un débit de 84 litres par seconde ou 300 mètres cubes à l'heure.

La conduite de refoulement a 7 kilomètres de long, et la perte de charge produite par le parcours est d'environ 6 mètres pour une ascension de 34m,35.

Cette conduite a un plan et un profil en long accidentés ; à chaque point bas se trouve un robinet de décharge et à chaque sommet une ventouse ou robinet à air.

La quantité d'eau élevée par jour est de 4,000 mètres, ce qui porte la consommation moyenne par habitant à 90 litres, la population totale étant de 45,000 âmes.

Le réservoir de distribution, bien que placé dans la partie haute de la ville n'eût pu alimenter la gare du chemin de fer et le premier étage des maisons voisines si on l'avait enfoui dans le sol ou même placé au niveau du sol ; on a dû en élever le radier à $7^m,50$ au-dessus du sol ; il peut contenir une hauteur d'eau de 5 mètres et un cube total de 2,300 mètres (figures 8 et 9, planche 14).

La dépense totale s'est élevée à 1 million de francs ; le prix de vente du mètre cube d'eau est fixé à 0 fr. 20 cent. pour les particuliers et à 0 fr. 10 pour les industriels.

6° DISTRIBUTION D'EAU DE CRÉTEIL.

La distribution d'eau de Créteil, qui n'a coûté que la modeste somme de 69,000 francs, peut être prise, dit M. Dumont, pour type des distributions d'eau à bon marché.

L'eau a été puisée à la Marne, à raison de 150 mètres cubes par jour, soit 136 litres par tête pour une population de 1,100 habitants.

La hauteur d'élévation est de $32^m,30$ au-dessus de l'étiage de la rivière. Le moteur est une machine à vapeur verticale de la force de six chevaux actionnant une pompe à double effet à piston plongeur.

La machine fait 15 tours à la minute ; le diamètre du piston est de $0^m,28$ et sa course $0^m,60$. La pompe donne 30 coups à la minute, son diamètre est de $0^m,24$ et la course du piston est de $0^m,60$ comme pour la machine motrice.

La conduite de refoulement a $0^m,160$ de diamètre.

Elle déverse les eaux dans trois réservoirs cylindriques en tôle espacés de $0^m,50$ et communiquant entre eux. Chaque réservoir a 4 mètres de diamètre intérieur et 4 mètres de hauteur : il contient 50 mètres cubes d'eau ; il est installé sur un plancher en chêne qui repose sur des murs en moellons de 8 mètres de hauteur et de $0^m,40$ d'épaisseur, reliés entre eux par des tirants en fer. Chaque réservoir a coûté 5,900 francs.

Des réservoirs partent les conduites de distribution. Les réservoirs métalliques aériens ont évidemment un grave inconvénient : ils sont trop sensibles à la température extérieure, et il conviendrait de les envelopper d'une épaisse chemise de matières peu conductrices de la chaleur.

D'autre part, l'emploi d'un moteur unique est dangereux ; il peut arriver des avaries qui entraînent plusieurs jours de chômage. Néanmoins, lorsque l'économie est la condition première d'établissement, il est clair qu'il vaut mieux n'installer d'abord qu'un moteur unique, se réservant d'en installer un second dans l'avenir. Mais cette solution doit être adoptée en connaissance de cause et l'ingénieur, chargé du projet, doit avoir soin d'en signaler tous les inconvénients aux populations intéressées.

7° DISTRIBUTION D'EAU DE LILLE [1].

Les eaux souterraines, dit M. Masquelez, ont desservi jusqu'à présent les usages domestiques de la ville de Lille. Dans certains quartiers, l'eau a un goût très-désagréable de fer ou de soufre. Ailleurs, elle est excessivement chargée de sels calcaires et contient des sulfates en proportion nuisible. Enfin, presque partout, on constate une grave altération, par suite d'infiltrations diverses dans les terrains très-perméables en contact, et on sait que, dans ce cas, la présence des matières organiques offre les plus grands dangers pour la santé.

Pour se procurer en eau potable tout le volume nécessaire aux usages industriels et domestiques, la ville de Lille avait à sa disposition :

Les quatre sources de Bénifontaine, à l'amont du flot de Wingles, d'un débit journalier minimum de.	10,000	mètres cubes.
Les sources de Seclin, perdues au fond du canal de Seclin et faciles à reconquérir.	10,700	—
Les sources de Billaut et de Guermanez.	5,000	—
La source de la Cressonnière, territoire d'Emmerin.	1,650	—
Eau drainée par l'aqueduc de captation de ces diverses sources. .	12,650	—
Total des ressources probables au minimum. . . .	40,000	—

Pour une population de 155,000 âmes, c'est une part minima de 176 litres par habitant et par jour.

Le mélange des eaux amenées à Lille présente une parfaite limpidité et un très-bon goût ; le degré hydrotimétrique est satisfaisant; ce mélange réalise donc tous les caractères d'une eau potable.

Le produit de chaque source est recueilli dans un aqueduc secondaire qui vient s'embrancher sur l'aqueduc collecteur, et celui-ci emmagasine toutes les eaux dans le réservoir inférieur, construit à Emmerin, au pied du long versant méridional du monticule de l'Arbrisseau.

Dans ce réservoir, les eaux sont reprises par des machines et élevées au sommet du monticule dans un réservoir placé à l'altitude de 50 mètres, c'est-à-dire dominant d'environ 30 mètres la ville de Lille et sa banlieue.

L'aqueduc collecteur des sources a son radier presque partout à $1^m,90$ au-dessous du niveau d'étiage des puits voisins du tracé, de sorte qu'il exerce par ce radier un drainage énergique du sol environnant ; il est du reste fondé dans un banc de craie fendillée permettant la communication avec la nappe des bas fonds de la vallée.

L'aqueduc collecteur traverse en siphon le flot de Wingles, la Deûle et le canal de Seclin ; les siphons sont établis avec conduites en fonte du diamètre de $0^m,60$ pourvues des joints élastiques Delperdange.

L'aqueduc collecteur, entre les sources de Bénifontaine et le réservoir inférieur a une longueur de 16,958 mètres avec une déclivité uniforme de $0^m,0002$.

[1] *Établissement de la distribution d'eau de Lille*, rapports et pièces à l'appui par M. Masquelez, ingénieur en chef des ponts et chaussées, directeur des travaux municipaux, un volume avec atlas, chez Dunod, éditeur.

Partout il est recouvert d'une épaisseur de terre d'au moins 1 mètre : quelques petites chutes sont ménagées, elles contribueront à l'aérage de l'eau et permettront d'installer des appareils de jaugeage. Aux prises d'eau des sources, aux extrémités des siphons sont établis des pavillons qui entretiendront dans le collecteur un courant d'air continuel; le collecteur présente du reste de grandes dimensions, précisément pour permettre la circulation de l'air, et aussi pour faciliter la circulation des ouvriers lors des réparations.

Outre les pavillons principaux, il existe des regards tous les 200 mètres.

La figure 6 de la planche 14 représente la section transversale de l'aqueduc collecteur dans la partie à radier libre qui repose sur la craie fendillée.

L'altitude de départ du collecteur est de.	$20^{m},31$
— d'arrivée.	$16^{m},20$
D'où un abaissement total de. . . .	$4^{m},11$
Sur lequel les chutes absorbent $0^{m},451$.	

Le point de départ du collecteur est à $1^{m},70$ au-dessous de la cote d'émergence moyenne des sources de Bénifontaine; cet abaissement a pour objet d'augmenter le débit des sources et d'en tirer le plus grand parti possible. A droite et à gauche, le collecteur principal reçoit les aqueducs secondaires qui lui amènent le produit des diverses sources énumérées plus haut.

Le réservoir inférieur est construit dans toute la hauteur de la craie aquifère; on a pu réduire à $0^{m},70$ l'épaisseur des murs de pourtour et à $0^{m},28$ celle du radier. D'où une grande économie, et la possibilité de recueillir par des barbacanes les eaux de suintement qui s'écoulent en abondance de la craie aquifère.

Le réservoir inférieur est calculé de manière à emmagasiner le produit des sources pendant vingt-quatre heures et il en est de même du réservoir supérieur; c'est donc une réserve totale de deux journées d'alimentation.

Le réservoir est divisé en deux compartiments que l'on peut réunir ou séparer à volonté, de manière à épuiser complétement l'un d'eux pour y procéder aux réparations nécessaires.

La hauteur d'eau ne doit pas dépasser $4^{m},10$; en service normal, elle se maintient à $3^{m},50$

Le réservoir supérieur a son radier à la cote 45 mètres et la hauteur d'eau peut s'y élever à 5 mètres; le niveau moyen du sol de la ville étant de 22 mètres, la pression moyenne atteindra $25^{m},50$ et sera plus que suffisante pour maintenir dans tout le réseau des conduites une pression convenable.

A l'autre extrémité de l'artère principale sera établi ultérieurement le réservoir de Saint-Maurice destiné à compléter le système.

Entre le réservoir inférieur et le réservoir supérieur, il existe deux conduites de refoulement de $0^{m},60$ de diamètre, capables de livrer passage chacune à 22,500 mètres cubes par vingt-quatre heures.

Actuellement, les deux conduites réunies ne donnent passage par jour qu'à 11,250 mètres cubes.

La hauteur maxima de l'élévation est de.	$34^{m},25$
La perte de charge due à l'écoulement du volume précité est de.	$0^{m},60$
Résistance totale à vaincre.	$34^{m},85$

La quantité à élever par seconde étant de 174 litres, entraine une dépense de travail mesurée par 81 chevaux vapeur.

On a adopté une force de 85 chevaux effectifs.

Le moteur est une machine horizontale de 85 chevaux effectifs, à haute pression, à détente variable et à condensation, munie d'un régulateur, ralentie à la vitesse de 16 tours par minute.

Une machine semblable est établie comme réserve pour suppléer la précédente en cas de chômage et la renforcer au besoin.

La machine actionne une pompe horizontale à double effet, dont tous les clapets, logés dans des chapelles facilement accessibles, offrent au passage de l'eau des sections telles, que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas $1^{m},50$ par seconde.

Le total des dépenses effectuées jusqu'ici est de 2,870,000 francs.

Le prix du mètre cube d'eau distribué revient à 0 fr. 044.

On trouvera dans l'ouvrage de M. l'ingénieur en chef Masquelez les devis et cahier des charges ainsi que l'analyse et le bordereau des prix qui ont servi de base à l'entreprise ; ces documents seront utilement consultés par les ingénieurs chargés de projeter une distribution d'eau.

DES RÉSERVOIRS D'AIR COMPRIMÉ

Les réservoirs d'air comprimé ont pour but de régulariser le mouvement de l'eau dans la conduite ascensionnelle, d'emmagasiner à certains moments l'excès de travail fourni par le moteur et de combler à d'autres moments le déficit dans le travail nécessaire au maintien du mouvement uniforme de l'eau.

La masse d'eau à mettre en mouvement par le moteur se réduit à celle qui est comprise entre ce moteur et le réservoir d'air comprimé ; la pompe peut donc obéir à toutes les variations de vitesse qui lui sont communiquées par le moteur, sans qu'il en résulte des chocs préjudiciables; ces chocs seraient perpétuels si la pompe devait mettre en mouvement une masse d'eau considérable qui constituerait un volant dangereux.

La régularité du mouvement ascensionnel de l'eau sera d'autant plus près d'être réalisée que les variations de pression de l'air comprimé dans le réservoir auront moins d'amplitude.

Il importe donc de déterminer en conséquence le volume du réservoir d'air comprimé : si V est le volume d'eau envoyé par la pompe à chaque coup de piston, comme la vitesse du piston va de zèro à un certain maximum, la régularité du mouvement ascensionnel suppose que le réservoir à air emmagasine la moitié du volume V.

Soit V_1 le volume maximum de l'air comprimé, V_2 son volume minimum, p_1 et p_2 les pressions correspondantes. On aura :

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{2} V$$

et, d'après la loi de Mariotte

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

La variation des pressions est $(p_2 - p_1)$ et la pression moyenne $\frac{1}{2}(p_1 + p_2)$; la régularité du mouvement qu'on obtiendra dépendra donc de la valeur du coeffi-

cient $\left(\frac{1}{n}\right)$ qui exprime le rapport de la variation des pressions à la pression moyenne.

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{n}\frac{p_1+p_2}{2}$$

La résolution de ces trois équations conduit à la relation :

$$V_1 = \frac{1}{4} V (2n+1)$$

qui déterminera V_1 lorsqu'on se sera donné la valeur de (n). Si l'on fait, par exemple $(n = 4)$, V_1 devra être égal à $\frac{9}{4}$ V et les dimensions du réservoir se trouveront par le fait déterminées.

Comme nous l'avons déjà dit, l'usage du réservoir à air comprimé a fait disparaître le vieux système des châteaux d'eau, dont l'effet était de réduire au strict minimum la masse de la colonne ascensionnelle que le moteur devait mettre en mouvement à chaque coup de piston.

« Les ingénieurs américains, dit M. Malézieux, n'accordent qu'une confiance limitée à ce mode de régularisation du jeu des pompes ; ils doutent de la possibilité d'alimenter sûrement les réservoirs d'air. Aussi emploient-ils généralement, par surcroît de précaution, un tuyau métallique implanté à l'origine de la conduite de refoulement : ce tuyau étant ouvert par le haut, l'eau peut s'y élever et y osciller librement. Ces tuyaux verticaux, qui portent le nom de stand-pipes, sont protégés contre la gelée par une chemise en maçonnerie. »

En France, il ne semble pas jusqu'à présent qu'on doive mettre en doute l'efficacité des réservoirs à air comprimé et qu'il y ait lieu de recourir à d'autres systèmes.

CHAPITRE VI

ÉLÉMENTS D'UNE DISTRIBUTION D'EAU

Parmi les éléments d'une distribution d'eau, nous étudierons successivement :

1° Les conduites,
2° Les appareils accessoires des conduites, robinets, ventouses,
3° Les appareils de distribution publique,
4° Les appareils de distribution privée,
5° Les réservoirs.

1° DES CONDUITES

On met en œuvre divers genres de conduites qui sont :

Les conduites en bois,
— en ciment ou poterie,
— en fonte,
— en tôle enduite de bitume.
— en plomb.

I. **Conduites en bois.** — L'un des systèmes de canalisation les plus anciens et qu'on emploie encore aujourd'hui çà et là, disent MM. Debize et Mérijot dans leur *Chimie technologique,* est formé par des tuyaux en bois. On prend des branches entières brutes, à travers lesquelles on perce, à la tarière, un trou de largeur convenable. Le choix de l'espèce de bois exerce une grande influence. Le prix peu élevé des sapins, leur régularité, la facilité de leur creusement les font souvent employer. On choisit, d'ailleurs, dans cette essence, autant que possible, le pin, que l'expérience a démontré comme étant le plus durable et le plus convenable. Pour éviter que le bois ne se fendille en se desséchant, et pour lui enlever ses principes solubles, on a généralement soin de maintenir les tuyaux un temps suffisant dans l'eau, avant de le mettre en place. Les assemblages se font, soit en emboîtant l'un dans l'autre les tuyaux convenablement taillés à leurs extrémités, soit simplement en reliant les deux bouts voisins par un anneau en fer, figure 33, muni de bords aigus, qui s'enfoncent dans chacune des parties. Les canalisations en bois, bien que très-économiques d'instal-

lation, se conservent très-mal et exigent un entretien coûteux; les anneaux d'assemblage se rongent par la rouille, le bois lui-même se modifie en peu d'années et passe à l'état de masse pourrie, absolument sans résistance. On a proposé d'imprégner le bois de goudron; mais, outre que cette préparation est coûteuse, elle donne souvent aux eaux uu goût qui persiste très-longtemps. Aussi, ces divers motifs ont-ils fait renoncer depuis longtemps au bois dans les

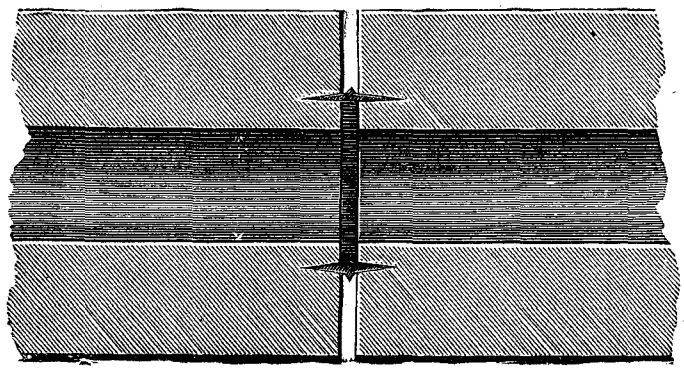

Fig. 33.

diverses installations, et on ne le rencontre plus que rarement et dans des cas spéciaux.

II. **Conduites en ciment ou en poterie.** — Il est facile aujourd'hui d'établir partout, à des prix modérés, des tuyaux en béton de ciment. Ces tuyaux conviennent plutôt à des aqueducs, à des conduites sans pression qu'à des conduites forcées.

On peut les fabriquer sur place, et par portions successives, comme nous l'avons vu faire pour les distributions d'eau d'Avallon et de Saint-Étienne; nous ne reviendrons pas sur les détails de fabrication suffisamment expliqués plus haut.

Beaucoup de fabriques de tuyaux de ciment se sont établies ; en général, leurs produits sont chers. Lorsqu'on a une certaine longueur d'aqueduc à exécuter il y a avantage à faire la dépense des moules et à exécuter les tuyaux sur place.

A Nîmes, la partie supérieure de la conduite d'adduction, soumise à de faibles pressions, a été exécutée avec des tuyaux en béton de ciment, sur un diamètre intérieur de $0^m,80$.

Les conduites en ciment d'un fort diamètre, dit M. Dumont, ne présentent sur la fonte d'avantages sérieux d'économie et de sécurité que lorsqu'on les emploie sous des charges ne dépassant pas 10 à 15 mètres.

Dans l'exécution des canalisations en béton de ciment, il faut se baser pour l'estimation de la dépense sur le prix minimum de 60 francs pour le mètre cube de béton employé, et il faut augmenter d'un sixième le volume des tuyaux, afin de tenir compte des bourrelets et des joints.

Voici, d'après M. Dumont, deux tableaux donnant l'épaisseur et le prix des tuyaux en ciment :

DIAMÈTRE DES TUYAUX	CHARGE SUR LES TUYAUX								
	5m			10m			15m		
	ÉPAISSEUr	CUBE	PRIX	ÉPAISSEUr	CUBE	PRIX	ÉPAISSEUr	CUBE	PRIX
mètre	mètre	m. c.	francs	mètre	m. c.	francs	mètre	m. c.	francs
0,60	0,10	0,25	15	0,20	0,57	54	0,30	0,98	60
0,65	0,11	0,34	20	0,22	0,69	41	0,33	1,05	69
0,70	0,12	0,36	22	0,25	0,78	47	0,35	1,35	81
0,75	0,13	0,42	25	0,25	0,92	55	0,37	1,52	91
0,80	0,14	0,47	28	0,27	1,05	63	0,40	1,75	105
0,85	0,15	0,55	33	0,29	1,20	72	0,43	2,00	120
0,90	0,15	0,58	35	0,30	1,30	78	0,45	2,20	132

Les tuyaux du diamètre 0m,30 ne peuvent se mouler à moins de 0m,08 d'épaisseur; ils coûtent alors 9 francs et peuvent résister à une charge de 7 mètres. Le prix augmente rapidement avec la charge.

De même, les tuyaux de 0m,25 ne peuvent se mouler avec une épaisseur inférieure à 0m,08, ils coûtent alors 8 francs et peuvent résister à une charge de 8 mètres d'eau.

Les tuyaux de 0m,20, 0m,15, 0m,10 de diamètre intérieur ne peuvent se mouler avec une épaisseur inférieure à 0m,07, 0m,07, 0m,06; ils coûtent alors 7 francs, 5 francs 50 et 4 francs, et peuvent résister à des charges de 10 mètres, 10 et 15 mètres d'eau.

« Les tuyaux en ciment, dit M. l'ingénieur Huet dans son rapport sur l'Exposition de 1867, sont bons et avantageux, lorsqu'il y a peu de raccords, de sinuosités, de coudes dans la conduite, de variations brusques de pression, c'est-à-dire qu'ils peuvent être employés avec sécurité plutôt pour conduire les eaux que pour les distribuer.

Les tuyaux en ciment de Grenoble, employés dans la dérivation des eaux de Nice, fonctionnent parfaitement sous une pression de trois atmosphères. Nous en dirons autant des tuyaux en terre cuite émaillée, et particulièrement des tuyaux Zeller d'Ollwiller (Haut-Rhin) avec joints en ciment. Ces derniers sont particulièrement remarquables par leur belle exécution; ils présentent sur les tuyaux en fonte une économie de 20 pour 100; ils ont sur eux, et surtout sur les tuyaux en tôle et bitume, l'avantage d'une durée indéfinie; ils ne subissent à l'intérieur aucune altération et ne favorisent pas les incrustations, les obstruc-

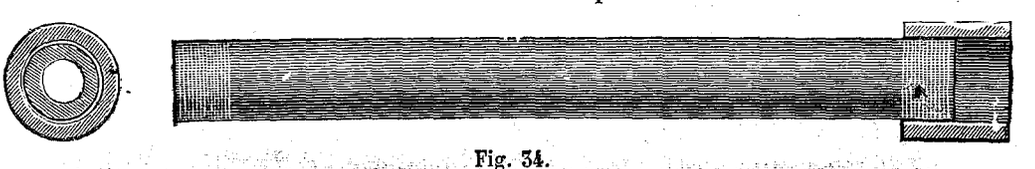

Fig. 34.

tions; leur assemblage se fait à l'aide de manchons, c'est-à-dire qu'ils sont uniformément droits, par conséquent d'une exécution facile et sûre. Ils ont été adoptés dans la canalisation d'un grand nombre de villes (Lunéville, Mulhouse, Soissons).

Les tuyaux anglais, qui s'assemblent à emboîtement, ne présentent pas la même finesse, la même perfection d'exécution; mais, rendus en France, ils ne reviennent encore qu'à moitié prix. Toutefois, leur véritable place est dans le drainage des habitations. »

L'assemblage des tuyaux, en ciment ou en terre cuite, se fait, soit par assemblage d'un bout mâle et d'un bout femelle, soit, le plus souvent, par le moyen d'un manchon couvre-joint, figure 34. Pour assurer l'étanchéité, un mastic est interposé; il faut éviter les mastics gras qui attirent les rats; et le mieux est de recourir à un mortier fin de ciment. Lorsque les tuyaux ont été émaillés au sel, l'émail est répandu sur toute la surface, interne et externe, et, pour obtenir l'adhérence du ciment, il est nécessaire de strier les bouts de tuyaux recouverts par les manchons.

Les tuyaux en poteries ne s'obtiennent guère sous des longueurs supérieures à 1^m50; ils ont donc le grave inconvénient de la multiplicité des joints; ils sont très-résistants aux pressions, mais manquent absolument de flexibilité, de sorte que les porte-à-faux leur sont très-préjudiciables.

On a fait des conduites en verre qui sont très-résistantes, mais très-fragiles et reviennent à un prix fort élevé.

III. **Conduites en fonte.** — Les conduites en fonte sont de beaucoup les meilleures; elles se fondent sur des longueurs de plusieurs mètres, présentent, par conséquent, peu de joints; elles sont très-résistantes, et s'obtiennent facilement sous une forme parfaitement régulière ; tous les raccords, tous les coudes, sont fondus à l'avance et s'assemblent d'une manière pour ainsi dire mathématique, ce qu'on ne saurait obtenir avec les autres systèmes ; les joints sont faciles à garnir et à rendre étanches.

Toutes les fois donc que l'économie de premier établissement ne sera pas formellement imposée, on devra donner la préférence aux tuyaux en fonte, du moins pour les conduites de grand diamètre, pour celles qui sont soumises à de fortes pressions et à des chocs, telles que les conduites ascensionnelles, pour celles qui sont contournées et changent fréquemment de direction.

Les divers systèmes de tuyaux en fonte ne varient que par le mode d'assemblage.

La longueur des tuyaux en fonte varie de $2^m,50$ à 3 et 4 mètres, non compris le joint des tuyaux à emboîtement; celui-ci forme une saillie de $0^m,10$ en sus de laquelle il faut compter un intervalle de $0^m,005$ pour la dilatation. Les tuyaux doivent être coulés verticalement, pour que leur épaisseur soit uniforme et réduite au strict nécessaire.

Les trois systèmes d'assemblage les plus répandus sont : 1° l'assemblage à emboîtement; 2° l'assemblage à brides; 3° l'assemblage à bagues. En voici la description sommaire :

1° **Assemblage à emboîtement.** — L'assemblage à emboîtement est représenté par la figure 35, le joint non garni, et la figure 36 présente, en demi-

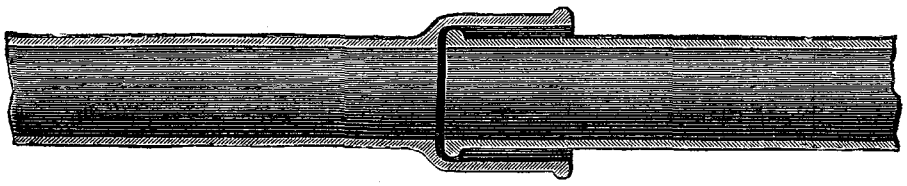

Fig. 35.

coupe longitudinale et demi-élévation, l'emboîtement d'un tuyau en fonte de $0^m,10$ de diamètre.

Pour former cet assemblage, après avoir placé le petit bout d'un tuyau dans l'emboîtement de l'autre, on remplit l'intervalle des deux parois avec de la corde goudronnée, qu'on fait pénétrer avec un ciseau à mater, jusqu'à ce qu'elle soit

arrêtée par le filet qui termine le tuyau intérieur. Quand elle est fortement comprimée, et qu'il ne reste plus à remplir qu'un intervalle de $0^m,04$ de longueur jusqu'à l'extrémité du joint, on garnit tout le pourtour de ce joint avec

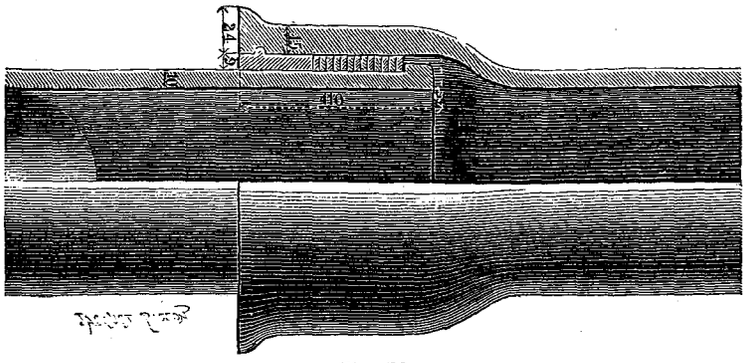

Fig. 36.

un boudin d'argile plastique, et l'on réserve dans cette argile, à la partie supérieure, une sorte de godet pour y couler du plomb fondu, de manière à remplir tout l'espace resté libre entre les deux parois des tuyaux. Ce plomb doit être à une température assez élevée pour qu'il ne se refroidisse pas au contact de la fonte, au point de se solidifier avant d'avoir rempli tout le vide du joint. On reconnaît que cette température est suffisante, quand une feuille de papier plongée dans le métal en fusion s'y enflamme. Le plomb, ainsi coulé, forme, entre la corde et le bourrelet de glaise, une bague continue qui ne peut plus être chassée par la pression de l'eau; car on a ménagé à l'intérieur de l'emboîtement une rainure annulaire, qui maintient le métal en place, même après que, s'étant refroidi, il s'est détaché de la surface de l'emboîtement pour serrer la surface du tuyau intérieur. Quand le refroidissement a eu lieu, le bourrelet de glaise est

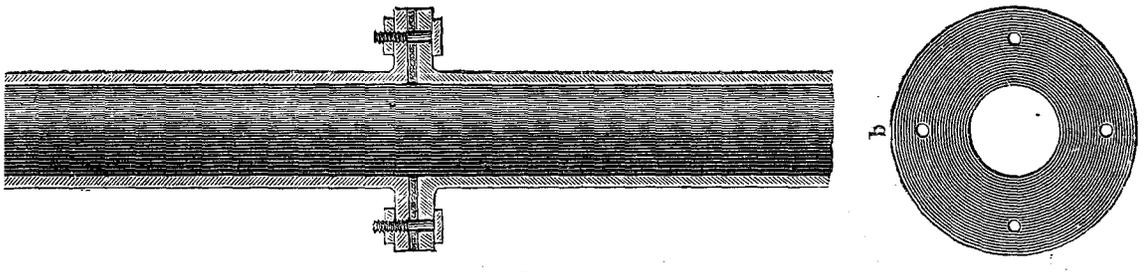

Fig. 37.

enlevé, le plomb est comprimé, avec le ciseau à mater, dans le pourtour du joint, et celui-ci est par là rendu complétement étanche.

2° **Assemblage à brides.** — Cet assemblage, figure 37, le seul employé autrefois, ne sert plus que pour la pose des robinets et appareils spéciaux. Il permet de changer ceux-ci, sans que l'on soit obligé de couper les tuyaux. La bride est une saillie annulaire, réunie au corps du tuyau par un congé et une surépaisseur de quelques centimètres de longueur. Cette surépaisseur est nécessaire pour tenir compte des soufflures, qui se produisent souvent dans les coudes; il faut les compenser par un surcroît de matières.

La face des brides est légèrement évasée et présente un fruit de $0^m,004$ à $0^m,005$, pour une longueur de $0^m,07$ à $0^m,085$. L'intervalle des brides est rempli par une rondelle en plomb, dont la section est également évasée; cette disposition des brides et de la rondelle a pour objet, lorsqu'on serre les boulons qui

complètent l'assemblage, d'empêcher le plomb comprimé de former à l intérieur du tuyau un bourrelet saillant, gênant l'écoulement des eaux. On achève le joint en matant soigneusement la rondelle de plomb.

3° **Assemblage à bagues.** — La figure 58 représente un assemblage à bagues pour tuyau de $0^m,10$ de diamètre; il consiste dans une bague de $0^m,08$ à $0^m,10$ de largeur, que l'on passe sur le joint; l'intervalle est rempli en plomb coulé et maté. Cette disposition n'est pas applicable aux tuyaux posés en terre; les tassements auxquels ils sont exposés donneraient lieu à des fuites, mais elle est couramment employée dans les égouts et partout où les tuyaux se trouvent maintenus dans une position parfaitement fixe. On emploie pour cela, soit des

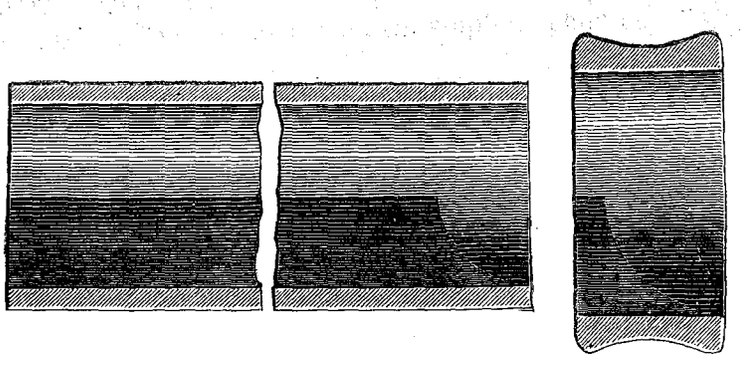

Fig. 58.

consoles scellées dans les murs, soit, pour les conduites de $0^m,80$ à $1^m,10$ de diamètre, des colonnettes en fonte. L'assemblage à bague permet de conserver aux tuyaux une forme cylindrique sur toute leur étendue et, par cela même, d'utiliser tous les bouts de tuyaux, sans manchons ni raccords spéciaux. De plus, la bague étant légèrement conique, il suffit, pour la desceller, de la frapper avec un marteau sur son pourtour. Le démontage se fait ainsi avec la plus grande facilité, sans couper le tuyau et sans feu pour fondre le plomb, avantage précieux sur les tuyaux à emboîtement.

Mamelon de prise d'eau. — Afin de faciliter l'exécution des travaux de prise d'eau à faire sur les conduites pour donner de l'eau dans les maisons particulières, on fait venir de fonte sur tous les tuyaux, près de l'emboîtement, un mamelon de $0^m,08$ de diamètre, dont la face extérieure est plane; ce mamelon épaissit en ce point la paroi du tuyau de $0^m,005$, et peut, quand il a été percé et taraudé, recevoir un robinet que l'on fixe en le vissant sur la conduite; un cuir interposé entre le collet adjacent au pas de vis et la face plane du mamelon rend le joint très-imperméable.

Les tuyaux de fonte sont préservés de l'oxydation au moyen d'un enduit de coaltar.

Tuyaux à joints forcés. — Les tuyaux à joints forcés, peu usités en France, le sont beaucoup plus en Angleterre. Les grandes usines de Glascow, merveilleusement outillées, fabriquent jusqu'à 30 tonnes, par jour, de tuyaux d'un modèle parfaitement régulier.

Chaque tuyau, figure 59, porte un bout mâle et un bout femelle; le bout mâle présente une surface légèrement conique, parfaitement tournée, et le bout femelle une surface conique égale, parfaitement alésée. Le contact de ces deux surfaces, pressées l'une contre l'autre par quelques légers coups de marteau, suffit pour assurer un joint parfaitement étanche.

Ce joint n'est pas coûteux et se fait en un instant; s'il se produit quelque fuite, elle est sans importance.

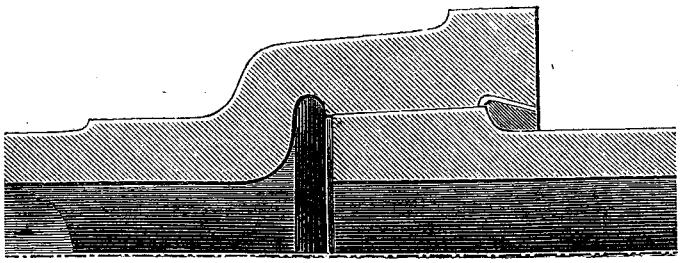

Fig. 39.

L'inconvénient est dans la rigidité du système, qui exige une pose des plus soignées.

Joint Doré. — Le joint sphérique Doré, qui est bien conçu et a donné de bons résultats, ne s'est sans doute pas propagé parce qu'il exige des modèles soignés et une fabrication minutieuse. — Le bout mâle se termine par un renflement sphérique convexe, et le bout femelle par un renflement sphérique concave; le coulage et le matage du plomb se font comme dans le joint à emboîtement cylindrique, mais on peut se passer de la corde goudronnée et même se contenter du matage à froid. — Par la forme même de l'emboîtement, le plomb ne peut s'échapper et toute rainure annulaire est inutile.

Le joint sphérique permet en outre une flexibilité relative qu'on ne saurait obtenir avec l'emboîtement cylindrique.

Joints à caoutchouc. — Pour éviter les fuites quelquefois considérables qui se produisent toujours aux joints des tuyaux, on a eu l'idée de substituer au chanvre goudronné et au plomb une matière plus élastique, épousant mieux

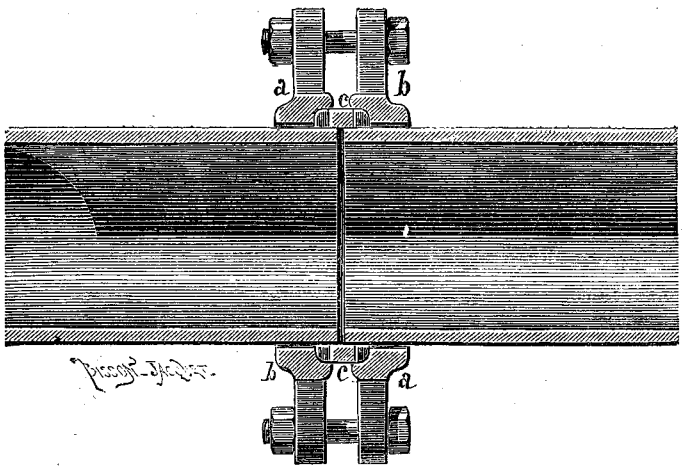

Fig. 40.

toutes les aspérités et se prêtant même à certaines déformations; nous voulons parler du caoutchouc.

Les joints Petit et Lavril sont les plus anciens; les seuls qui semblent restés dans la pratique sont le joint Marini et le joint Delperdange.

Le *joint Marini*, figure 40, se compose de deux brides mobiles *ab* s'engageant à frottement doux sur les conduites, de deux cordes circulaires en caoutchouc accolées à ces brides et d'une bague en fonte *cc* ou couvre-joint de $0^m,03$ de largeur. On engage sur chaque tuyau une bride avec son caoutchouc, on place le couvre-joint, puis on rapproche les brides et on opère le serrage des boulons;

le caoutchouc pénètre dans tous les interstices, et l'on obtient un joint tout à la fois étanche et flexible.

Le *joint Delperdange* est vivement recommandé par M. l'ingénieur en chef Masquelez, qui en a fait grand usage à Lille et à Valenciennes; ce joint a donné environ vingt fois moins de fuites que le joint au plomb. — Les fuites les plus sérieuses, dit-il dans son ouvrage sur la distribution d'eau de Lille, ont eu lieu à des joints à brides boulonnées et au plomb; « les petits accidents arrivés à des extrémités de conduites, momentanément interrompues pour aller en exécuter d'autres, s'expliquent parfaitement par des coups de bélier, qui ont disparu depuis que nous avons pu fermer tous les circuits, ainsi qu'on doit le faire dans tout réseau bien combiné, non-seulement pour équilibrer les pressions et faciliter l'alimentation des grands consommateurs, mais encore pour éviter les dépenses d'eau et d'appareils qu'il faudrait accepter, dans le cas du maintien d'un certain nombre de terminus, en vue d'empêcher l'eau d'y devenir insalubre à cause de sa stagnation. »

Des expériences précises ont constaté que :

« 1° Une conduite résistait à une pression de 16 atmosphères, sans manifester aucune fuite; 2° que des bagues en caoutchouc, employées depuis quatre ans sous une pression de 7 atmosphères, étaient parfaitement conservées; 3° qu'en recouvrant le joint d'un lut protecteur, on obtiendrait une grande garantie pour la conservation du caoutchouc et du collier en fer, dont la durée en bon état formait la seule inconnue; 4° que la célérité de la pose ne laissait rien à désirer, en raison de l'extrême perméabilité du joint; 5° que l'élasticité était très-avantageuse dans les sols peu résistants; 6° enfin, qu'on pourrait réaliser une économie suffisante pour faire face, en cas d'insuccès, au remploi des tuyaux avec des manchons fixés au plomb. »

L'altération du caoutchouc dans le sol semble être surtout le résultat de la qualité insuffisante du produit mis en œuvre; car on sait que les soupapes et pistons en caoutchouc font un excellent service dans les pompes d'épuisement.

Le lutage au brai de goudron du collier isole non-seulement le collier, mais encore la bague en caoutchouc, de l'humidité et des influences délétères qui peuvent tenir à la nature même du terrain.

L'avantage du joint Delperdange est de permettre un démontage facile; avec les emboîtements, il faut briser le premier tuyau qu'on enlève, et généralement

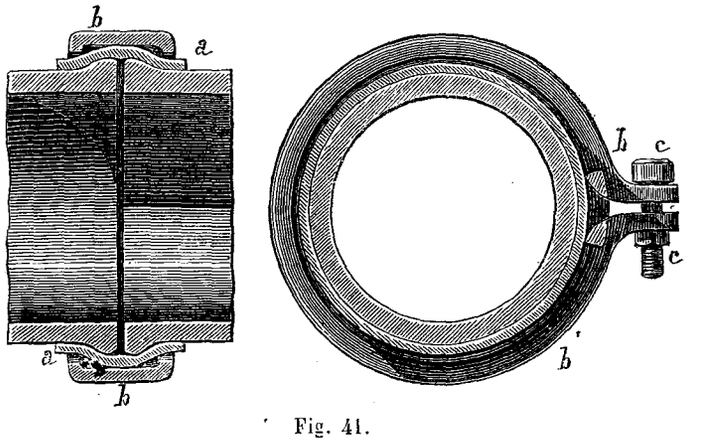

Fig. 41.

on les déforme; les tuyaux à joint Delperdange, lorsqu'ils sont devenus d'un trop faible diamètre, peuvent être démontés et reportés sur une autre artère de moindre importance.

La figure 41 représente le joint Delperdange ; les deux tuyaux voisins sont aboutés et présentent un renflement d'extrémité sur lequel s'applique et se moule la bague en caoutchouc a, a ; sur la bague en caoutchouc on pose le collier en fer bb, auquel on fait subir un serrage convenable au moyen de l'écrou c, c.

Les joints au caoutchouc sont donc excellents lorsque cette matière est bien préparée ; malheureusement, il est très-difficile d'avoir du caoutchouc vulcanisé parfaitement homogène : trop vulcanisé, le caoutchouc devient cassant ; vulcanisé d'une manière insuffisante, il se décompose peu à peu.

Résistance des tuyaux. — Nous avons donné à la page 14 de l'*Hydraulique* les formules qui permettent de calculer la résistance d'un tuyau ou d'une sphère.

Si h est la charge du fluide intérieur exprimée en kilogrammes par mètre carré et d le diamètre du tuyau, la force qui tend à séparer en deux parties égales, suivant un plan diamétral, un bout de tuyau d'un mètre de long, est égale en kilogrammes à hd.

La surface-résistance de métal est représentée par $2e$, e étant l'épaisseur du tuyau, et, si R est la tension maxima qu'on veuille imposer à la matière par mètre carré de surface, l'épaisseur e résultera de l'équation

$$hd = 2\mathrm{R}.e$$

Admettons pour la fonte une tension maxima de 1 kilogramme par millimètre carré, ou d'un million de kilogrammes par mètre carré, et soit un tuyau de $0^m,50$ de diamètre soumis à une pression de 8 atmosphères ou de 80,000 kilogrammes par mètre carré, nous aurons l'équation

$$80{,}000.0{,}50 = 2.1{,}000{,}000.e,$$

qui donne

$$e = 0^m,02.$$

C'est une épaisseur suffisante, qu'on n'adoptait pas autrefois parce qu'on pensait qu'elle pouvait conduire à un mauvais moulage et donner des tuyaux défectueux.

On essaye les tuyaux en général à une pression cinq fois plus grande que celle qui doit leur être couramment imposée ; on arriverait ainsi à $e = 0{,}10$ avec la formule précédente, et ce serait une dimension trop considérable ; avec cette formule, il suffirait de compter une pression double de la pression réelle.

Pour les tuyaux en fonte coulés debout, on a proposé la formule :

$$e = 0{,}0016\,n.d + 0{,}008,$$

dans laquelle n exprime la pression normale exprimée en atmosphères et multipliée par 5 ; si nous l'appliquons à l'exemple précédent, nous trouvons

$$e = 0^m,04$$

Voici l'épaisseur normale des tuyaux adoptés pour le service de Paris, qui peuvent convenir à une distribution quelconque : on a pris pour n la valeur 10 atmosphères.

DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR	DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR	DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR
mètre	millim.	mètre	millim.	mètre	millim.
0,10	9,25	0,30	12,25	0,60	17
0,15	9,75	0,35	13,25	0,80	19
0,20	10,25	0,40	13,50	1,00	21
0,25	11,25	0,50	15,00	1,10	24

Il est indispensable de prescrire dans les devis que les tuyaux en fonte seront coulés debout; c'est le seul moyen d'obtenir une bonne fabrication. Cette manière d'opérer est, du reste, devenue la pratique courante de toutes les bonnes usines.

Machine à essayer les tuyaux. — Les tuyaux s'essayent, comme les chaudières à vapeur, au moyen d'une pompe comprimant l'eau jusqu'à une pression déterminée. — Les essais au moyen d'un gaz comprimé sont évidemment inadmissibles à cause de la force expansive du gaz; si l'appareil essayé venait à se rompre, les débris, projetés avec violence, pourraient causer les plus graves accidents.

Avec l'eau comprimée, rien de pareil n'est à craindre; l'appareil essayé peut se crever et se briser, mais la pression de l'eau tombe instantanément dès qu'elle est au contact de l'air; l'eau manque de ressort et il n'y a point de projection à craindre.

Les figures 1, 2 de la planche 10 représentent la machine à essayer les tuyaux : le tuyau est fortement serré entre deux plaques verticales en fonte, l'une fixe, l'autre mobile, maintenues par des tirants en fer; entre les tuyaux et les plaques sont interposés des matelas en cuir maintenant les joints étanches. Le tuyau est rempli d'eau au moyen de la pompe foulante, et l'air s'échappe par un petit trou qu'on ferme ensuite avec une cheville.

Avec la presse hydraulique, on détermine une pression croissante, dont le maximum dépend de la position du contre-poids de la soupape; quand le maximum est atteint, la soupape s'ouvre et la pression tombe instantanément.

Quelquefois, le tuyau se crève; quelquefois, il livre passage à des jets d'eau ou à des suintements considérables, ce qui indique des soufflures. Alors il convient de le rejeter.

IV. **Conduites en tôle.** — Les tuyaux en fer sont avantageux pour les petits diamètres; ils peuvent n'avoir qu'une faible épaisseur; mais ils sont plus sujets encore à l'oxydation que les tuyaux en fonte, et sont bientôt criblés de trous.

Malgré l'abaissement qu'a subi le prix de la fonte, les tuyaux en tôle recouverte de bitume, connus sous le nom de tuyaux Chameroy, sont d'un usage très-répandu.

Ces tuyaux, de 4 mètres de longueur, sont formés d'une feuille de tôle cintrée, rivée et soudée suivant une génératrice du cylindre. Ils sont plombés à l'intérieur et préservés par une couche de vernis ou bitume minéral et cire; à l'extérieur, la tôle est recouverte d'une couche de bitume de $0^m,01$ à $0^m,02$ d'épaisseur; pour déterminer l'adhérence de l'asphalte et de la tôle, on enroule autour de celle-ci une corde de chanvre.

A l'origine, pour opérer l'assemblage de deux tuyaux consécutifs, on appliquait sur le bout mâle un pas de vis en métal fusible et on taraudait sur le bout femelle un pas de vis semblable, on garnissait avec du chanvre et on obtenait un joint étanche, mais coûteux et rigide.

On applique maintenant un joint à emboîtement précis. Le bout mâle et le bout femelle sont enduits d'un métal fusible; le bout mâle porte quelques rainures circulaires peu profondes, dans lesquelles on enroule des brins de filasse imprégnés d'une graisse formée d'axonge et de poudre de plombagine très-fine. Toute la bague est frottée de cette même graisse; en poussant les deux tuyaux l'un dans l'autre, au moyen d'un levier, on obtient un emboîtement précis et un joint étanche.

Le vernis intérieur, bitume minéral et cire, forme une couche de 1 à 2 milli-

mètres d'épaisseur ; l'enduit extérieur s'applique en étendant le bitume sur une table en fonte saupoudrée de gravier, puis on roule le tuyau en tôle, garni de

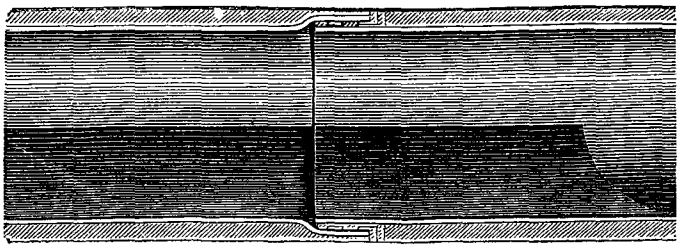

Fig. 42.

chanvre, comme nous l'avons dit, et le bitume y adhère. A la surface restent les grains de gravier incrustés dans la pâte.

Les prises d'eau sont difficiles à obtenir sur place, dans de bonnes conditions, avec les tuyaux de ce genre ; il convient de les prévoir et de préparer à l'avance les tubulures.

V. **Conduites en plomb.** — On a coulé autrefois des tuyaux en plomb jusqu'au diamètre de $0^m,216$, avec une longueur de 4 mètres.

En 1818, on a renoncé à ce mode de fabrication pour faire des tuyaux en plomb étiré ; on n'a pas dépassé le diamètre de $0^m,108$.

En 1840, on a encore substitué au procédé précédent un système nouveau qui consiste à repousser le plomb pour le faire passer par une surface annulaire et produire ainsi des tuyaux jusqu'au diamètre de $0^m,10$ inclusivement.

Pour les tuyaux d'un plus fort diamètre, on les forme avec des tables de plomb coulées d'avance. On prend dans une table une largeur égale au développement de la circonférence qui correspond au diamètre du tuyau à fabriquer, on roule cette table sur un billot et on fait une suture longitudinale.

Le plomb se rompt sous une tension de 1 kil. 35 par millimètre carré. On peut avec sécurité soumettre le plomb à une tension égale au quart de celle qui produit la rupture.

Ce qui donne pour le coefficient de résistance $R = 0^k,325$.

La résistance du plomb est donc beaucoup moindre que celle de la fonte et son prix est trois fois plus grand.

L'économie a donc fait renoncer aux grands tuyaux de plomb ; mais, par leur flexibilité et leur mise en œuvre facile, ils rendent de grands services pour l'installation des bornes-fontaines et la distribution intérieure des édifices.

Les assemblages des tuyaux en plomb se font par soudure.

PRIX DES CONDUITES

Les conduites entrent pour beaucoup dans la dépense qu'entraîne une distribution d'eau. C'est un élément intéressant à connaître.

Aussi nous avons recueilli dans divers ouvrages les prix de plusieurs espèces de conduite :

1° Dans les *Nouvelles Annales de la construction*, de 1863, nous trouvons les prix suivants :

TUYAUX A EMBOITEMENT ET CORDON AVEC JOINT AU PLOMB ET A LA CORDE GOUDRONNÉE

LONGUEUR DE CHAQUE TUYAU 2m50

Diamètre. . . (mèt.).	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,244	0,297	0,324	0,350	0,40	0,50	0,60
Épaisseur. . . (mèt.).	0,0095	0,01	0,01	0,0105	0,011	0,0115	0,012	0,013	0,013	0,0135	0,0145	0,016	0,018
Poids. . . . . (kil.).	56	78	95	120	145	170	210	270	300	335	390	530	710
Prix par mètre. (fr.). . (Pose comprise.)	7,85	10,55	12,75	15,65	18,45	21,80	26,70	33,30	36,70	40,30	48,50	64,50	85

TUYAUX EN TOLE ET BITUME, SYSTÈME CHAMEROY

Diamètre. . . . (mètre).	0,035	0,042	0,054	0,068	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,244	0,271	0,297	0,324	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,700	0,800	1,00
Poids par mètre. (kilog.).	4	5	6	7,5	8,5	11	14	17	22	25	28	33	39	45	52	70	78	90	95	100	125	155	210
Prix par mètre.. (franc). (Pose comprise.)	2,05	2,30	2,65	3,00	3,80	5,25	7,00	8,70	10,50	12,20	14,40	16,65	18,95	22,95	27,30	31,20	36,70	43,35	60,95	68,45	74,60	90,75	125

PRIX DES CONDUITES DE LYON

PAR MÈTRE COURANT, Y COMPRIS FOURNITURES, POSE ET TRANCHÉE, D'APRÈS LE TRAITÉ PASSÉ AVEC L'USINE DE FOURCHAMBAUD

	mètre.		francs.
Diamètre de.	0,60	Prix.	78,25
—	0,50	—	59,35
—	0,40	—	44,50
—	0,35	—	39,10
—	0,30	—	32,25
—	0,25	—	25,75
—	0,216	—	20,90
—	0,16	—	15,10
—	0,108	—	10,60
—	0,081	—	8,25

CONDUITES DE LA VILLE DE LILLE

DIAMÈTRES	LONGUEUR	Poids par mètre courant	Prix de la fonte par mètre	Pose par mètre courant tout compris	Confection d'un joint à bride, tout compris	Joint à emboîtement tout compris	Coupement d'un tuyau	Joint Delperdange tout compris
mètres	mètres	kil.	francs	francs	francs	francs	francs	francs
0,60	3,60	216	35,25	4,95	29,10	10,70	6,00	35,90
0,50	»	168	29,40	4,43	23,50	8,30	5,00	29,80
0,40	»	124	20,25	4,15	18,65	6,70	4,00	23,30
0,30	3,00	85	13,85	3,76	14,00	5,20	3,00	13,40
0,25	»	69	11,25	3,50	11,80	4,40	2,50	11,30
0,20	»	51	8,35	3,20	8,65	3,30	2,00	8,90
0,15	»	35	5,70	3,00	7,25	2,50	1,50	6,50
0,125	»	28	4,60	2,83	6,13	2,30	1,25	5,30
0,10	»	22	3,70	2,62	4,40	1,90	1,00	4,50
0,075	»	16	2,60	2,50	3,64	1,65	0,75	3,45

La pose est supposée faite à une profondeur de $1^m,10$; le prix indiqué comprend le démontage de la chaussée ou du trottoir, l'ouverture de la tranchée, le dressement du fond, remblai, pilonnage et enlèvement des terres en excès, transport des tuyaux à pied d'œuvre, descente des tuyaux, mise en place, ajustage et garnissage du joint au brai de goudron, essai en tranchée et repavage sur couche avec $0^m,15$ de sable neuf.

Le kilogramme de plomb neuf était payé.	0,75
Le percement d'un trou de $0^m,013$ à $0^m,045$ de diamètre sur une conduite en fonte.	2,00
Le percement d'un trou de $0^m,05$ à $0^m,10$ de diamètre sur une conduite	4,00
Le kilogramme de corde goudronnée.	1,00
Le kilogramme de minium préparé pour la confection des joints, dans la proportion de deux parties de céruse pour une de minium. . . .	1,00
Le kilogramme de brai de goudron pour garnissage des joints.	0,08
— de bitume.	0,55
— de cuir gras pour joints.	7,00

Voici maintenant quelques prix relatifs aux conduites pour distribution intérieure :

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	DIAMÈTRES									
	$0^m,02$	0,025	0,03	0,04	0,05	0.06	0,075	0,10	0,125	0,15
Mètre courant de tranchée à $1^m,20$ de profondeur, compris démontage de la chaussée et du trottoir, déblai, remblai, repavage et entretien pendant un an.	fr. 2,15	fr. 2,15	fr. 2,15	fr. 2,15	fr. 2,15	fr. 2,15	fr. 2,17	fr. 2,77	fr. 2,42	fr. 2,57
Idem, sans pavage.	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,77	0,82	0,87
Le mètre courant de tuyau en fonte, compris goudronnage, fourniture des joints, mise en place et essai.	2,60	2,80	3,10	3,40	4,00	4,70	6,00	7,50	9,00	10,50
Le mètre courant de tuyau en plomb, compris pose et soudures :										
Épaisseur. . $0^m,006$. . .	3,80	4,80	»	»	»	»	»	»	»	»
— . . $0^m,007$. . .	»	»	6,25	8,00	10,25	12,25	»	»	»	»
— . . $0^m,008$. . .	»	»	»	»	»	15,00	20,00	»	»	»
Conduite en fer soudé, à recouvrement.	»	3,40	3,50	4,00	5,50	6,50	»	»	»	»
Plus-value pour parties coudées. .	»	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	»	»	»	»

CONDUITES DE SAINT-ÉTIENNE

« La canalisation de Saint-Étienne, dit M. de Montgolfier, est tout entière en fonte. Les tuyaux sont à emboîtement et à cordon ; ils ne portent des brides que pour les raccords avec les appareils de la distribution. Le tableau suivant indique le poids et les principales dimensions des différents diamètres employés ;

DIAMÈTRES	LONGUEUR UTILE	POIDS		ÉPAISSEURS NORMALES		EMBOITEMENTS			BRIDES				MANCHONS — Poids
		Par tuyau	Par mètre	Tuyaux droits	Tuyaux courbes	Longueur	Épaisseur	Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Épaisseur	Fruit	Nombre de tours	
0,50	2,50	551	196	0,016	0,02	0,13	0,021	0,556	0,682	0,024	0,005	12	241
0,30	—	276	108	0,013	0,016	0,13	0,018	0,350	0,474	0,021	—	8	112
0,25	—	215	75	0,012	0,015	0,11	0,017	0,298	0,411	0,02	—	6	82
0,216	—	171	62	0,0115	0,015	—	0,0155	0,250	0,377	0,018	—	6	66
0,192	—	146	52	0,011	0,0145	—	0,015	0,252	0,347	0,018	—	6	56
0,135	—	96	35	0,01	0,012	—	0,014	0,175	0,280	0,017	—	5	38
0,108	—	78	28	0,01	0,012	—	0,014	0,148	0,253	0,017	—	4	27
0,081	—	58	20	0,0095	0,0115	—	0,0135	0,120	0,224	0,016	—	3	20
0,054	—	34	13,5	»	»	—	»	»	»	»	»	»	»
0,04	1,50	14,5	9,7	»	»	—	»	»	»	»	»	»	»

« Les joints des tuyaux à emboîtement sont faits avec de la corde goudronnée et du plomb fondu. La corde est mattée au refus à l'aide d'un ciseau, de manière à laisser dans l'emboîtement un vide circulaire de $0^m,04$ de profondeur dans lequel on coule du plomb qui est lui même matté après le refroidissement. Les joints à brides sont faits à l'aide d'une rondelle en plomb de $0^m,015$ à $0^m,02$ d'épaisseur, ferrée dans le joint par les boulons et mattée après le serrage. »

« Les conduites ont été posées de façon que le dessus du tuyau se trouve à $1^m,40$ en contrebas du niveau du sol. Leur prix de revient au mètre courant s'établit ainsi qu'il suit :

DIAMÈTRES		0,50		0,30		0,25		0,216		0,192		0,135		0,108		0,081		0,054		0,04	
DÉTAIL POUR UN MÈTRE COURANT DE TUYAU	Prix élémentaire	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX
Démontage et réfection de la chaussée.	fr. 0,70	mq. 1,60	fr. 1,12	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,20	fr. 0,84	m. 1,15	fr. 0,80	mq. 1,05	fr. 0,73	mq. 1,00	fr. 0,70	mq. 1,00	fr. 0,70	mq. 1,00	fr. 0,70
Ouverture de la tranchée dans les terres fortes.	0,40	mc. 2,30	0,92	mc. 1,60	0,64	mc. 1,50	0,60	mc. 1,43	0,58	mc. 1,40	0,56	mc. 1,25	0,50	mc. 1,10	0,44	mc. 1,00	0,40	mc. 1,00	0,40	mc. 1,00	0,40
Dressement de fond et façon des niches.	»	»	0,40	»	0,20	»	0,17	»	0,17	»	0,16	»	0,13	»	0,10	»	0,09	»	0,08	»	0,08
Enlèvement des terres excédantes. . . .	»	»	0,30	»	0,20	»	0,17	»	0,17	»	0,16	»	0,13	»	0,10	»	0,09	»	0,08	»	0,08
Remblais pilonnés.	0,25	2mc30	0,57	1,60	0,40	1,50	0,36	1,45	0,36	1,40	0,35	1,25	0,31	1,10	0,27	1,00	0,25	1,00	0,25	1,00	2,05
Fourniture de la fonte.	0,165	221	36,46	111k	18,32	86k	14,19	69k	11,39	58k	9,57	38k	6,27	31k	5,11	20	3,30	14k	2,31	9	1,43
Transport à pied d'œuvre, descente et mise en place.	»	»	1,00	»	0,80	»	0,75	»	0,75	»	0,70	»	0,60	»	0,55	»	0,40	»	0,30	»	0,25
Plomb, corde goudronnée et façon des joints.	»	»	5,00	»	3,00	»	2,80	»	2,50	»	2,00	»	1,40	»	1,20	»	0,90	»	0,70	»	0,60
TOTAL.			45,77	»	24,47	»	19,93	»	16,93	»	14,34	»	10,14	»	8,50	»	6,13	»	4,82	»	3,84
Outils, faux frais et bénéfices $\left(\frac{1}{10}+\frac{1}{20}\right)$.			6,86	»	3,67	»	2,99	»	2,64	»	2,15	»	1,52	»	1,27	»	0,92	»	0,72	»	0,58
Prix d'application par mètre courant de conduite. . .			52,63	»	28,14	»	22,94	»	19,57	»	16,49	»	11,66	»	9,77	»	7,05	»	5,54	»	4,42

Importance des fuites dans les conduites. — M. Whitney, ingénieur américain de Cambridge (Massachussets), signalait dans ces dernières années, à une réunion de la Société américaine des Ingénieurs civils, la diminution notable de la quantité d'eau distribuée à Cambridge, diminution qui pouvait devenir dangereuse en cas d'incendie. Des observations furent faites à l'aide de siphons et de manomètres ; elles avaient lieu le matin alors que la consommation est presque nulle. On trouva des fuites nombreuses et considérables qui furent rapidement étanchées ; aussitôt, et sans agrandissement de la conduite maîtresse, on obtint un surcroît de charge de $10^{m},67$ et on put assurer l'alimentation de chaque maison. On reconnut que bien des fuites faisaient perdre 4 à 5 mètres cubes par heure.

Bien que la pose des tuyaux soit généralement faite chez nous avec plus de soin qu'en Amérique, il doit exister dans les canalisations en tranchée bien des fuites du genre de celles que nous venons de signaler. Ces fuites peuvent exister longtemps sans que l'on s'en aperçoive; car l'eau ne paraît à la surface qu'autant que c'est de ce côté qu'elle trouve la voie d'écoulement la plus facile.

Dans l'opinion des ingénieurs américains, il existe beaucoup de distributions où la moitié de l'eau n'arrive point à la destination.

On peut se rendre compte de l'influence d'une faible fuite au moyen du calcul suivant :

Soit un trou carré de 1 millimètre de côté, sur lequel s'exerce une charge d'eau de 16 mètres : l'eau en sortira avec une vitesse égale à 4 fois $\sqrt{2g}$ ou à 17 mètres ; le débit, avec le coefficient 0,6, sera donc à la seconde de $0^{mc}00001$ environ, soit de 1 centilitre. En vingt-quatre heures ce débit atteindra 864 litres, et si, dans une canalisation importante, il y avait un millier de fuites de ce genre, on perdrait 864 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures.

L'étanchéité des joints doit donc être la préoccupation constante des constructeurs.

Pressions dues à la congélation de l'eau. — Les conduites mal protégées périssent souvent par l'effet des pressions dues à la congélation de l'eau qu'elles renferment.

Nous avons vu, en physique, combien était considérable la force expansive de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état solide. La densité de la glace est de 0,918 de sorte que le volume solide est au volume liquide dans le rapport de 1,089 à 1

Des expériences anciennes ont mis en évidence la force expansive de l'eau qui se liquéfie : Huyghens a fait crever un canon de fusil rempli d'eau et placé tout fermé dans un mélange réfrigérant.

Dans des expériences récentes, MM. Martins et Chancel ont fait éclater de bombes de $0^{m},32$ de diamètre extérieur et de $0^{m},039$ d'épaisseur, remplies d'eau et plongées dans un mélange réfrigérant ; sous l'influence de la pression, le point de congélation de l'eau s'abaissait jusqu'à un certain moment où la résistance de la bombe était vaincue. La rupture des projectiles s'est produite sous des pressions qu'on peut évaluer à 500 ou 520 atmosphères.

Le point de congélation de l'eau s'abaisse de 1 degré pour une pression de 133 atmosphères ; il y a donc eu un abaissement de 3 à 4 degrés, ce qu'on a pu en effet constater par un thermomètre plongé dans la partie restée liquide au centre de la bombe.

On ne saurait donc résister efficacement aux pressions produites par la congélation de l'eau; il n'y a qu'une chose à faire, c'est de mettre toutes les conduite

et tous les appareils fermés et pleins d'eau à l'abri de la gelée. C'est une précaution indispensable.

Incrustations et dépôts dans les conduites. — Il se produit dans les conduites en fonte des dépôts de diverses natures : des dépôts boueux ou calcaires et des dépôts ferrugineux formés par action sur la matière même des conduites. Les dépôts boueux sont assez rares et ne peuvent se produire que dans les conduites à très-faible pression; il est, en tout cas, facile de s'en débarrasser s'ils deviennent gênants.

1° *Dépôts calcaires.* — Nous avons vu que le bicarbonate de chaux était soluble dans l'eau en proportion notable ; mais l'excès d'acide carbonique se dégage lorsque l'eau est agitée et exposée à l'air, le carbonate simple ne peut plus rester en dissolution et se dépose sur les parois des conduites, qu'il ne tarde pas à obstruer. C'est le phénomène bien connu des fontaines incrustantes.

Lorsque les dépôts renferment en outre du sulfate de chaux, ces dépôts sont durs et adhérents. En Bavière, on se sert de conduites en bois ou les eaux salines déposent une couche de gypse qui obstrue le tuyau en quelques années ; on atténue le mal en faisant circuler de temps en temps dans les conduites de l'eau douce qui redissout le sulfate de chaux.

Les dépôts formés dans les conduites de l'eau séléniteuse d'Arcueil, à Paris, ont la composition suivante :

0,90	de carbonate de chaux,	
0,06	—	de magnésie,
0,022	—	de sulfate de chaux,
0,018	—	de matières organiques et oxyde de fer.
1,000		

On pourrait à la rigueur se débarrasser des dépôts calcaires en laissant séjourner dans les conduites pendant quelque temps une eau légèrement acidulée à l'acide chlorhydrique ou à l'acide azotique, mais l'opération demanderait à être conduite avec précaution et arrêtée au moment où l'attaque du métal prendrait des proportions dangereuses.

Le mieux serait encore de relever successivement les diverses sections des conduites, et de les soumettre à un grattage méthodique.

Nous signalerons pour mémoire les obstructions produites dans les conduites par les racines d'arbres qui pénètrent dans les joints et développent à l'intérieur des végétations ayant la forme d'une queue de renard ; ces accidents n'arrivent guère que dans les tuyaux de drainage ; on y remédie en relevant la conduite.

2° *Dépôts ferrugineux.*. — La formation des dépôts ferrugineux, qui ont affecté à Grenoble et à Cherbourg la forme de tubercules localisés, est nettement expliquée dans la *Chimie technologique* de MM. Debize et Mérijot; nous leur empruntons les lignes suivantes :

« On sait que la rouille se produit seulement quand le fer est en contact avec l'oxygène en présence de l'eau. Mais, l'effet de l'eau dans ce cas dépend entièrement des principes qu'elle renferme en dissolution, et l'on est porté à croire notamment que l'azotate d'ammoniaque joue un rôle important. Ce sel, il est vrai, ne se trouve dans les diverses eaux qu'en très-faibles doses, mais il existe toujours même dans l'eau distillée.

« La réaction est du reste facile à comprendre : l'acide azotique détermine l'oxydation du fer ; il se forme d'abord de l'oxydule qui passe à l'état d'oxyde en

empruntant à l'air son oxygène, cet oxyde est précipité à l'état d'hydrate par l'ammoniaque, avec ou sans entraînement des matières organiques, suivant les cas, et l'azotate d'ammoniaque se reformant détermine de nouveau l'attaque du fer. Kersting a fait des essais comparatifs sur l'action de l'eau distillée seule, de l'eau distillée avec divers sels, de l'eau de la Duna et de l'eau du canal de la Duna à Riga. Après douze heures de contact, 5 kilogrammes d'eau avaient enlevé aux tuyaux de fonte les quantités suivantes en milligrammes :

Eau distillée de.	17mm,16 à 33mm,66
— avec 1p. 0/0 d'azotate de potasse.	63mm,36
— — d'azotate d'ammoniaque.	168mm,96
— — de carbonate de soude..	2mm,64
Eau de la Duna.	7mm,92 à 11mm,54
Eau du canal de la Duna..	23mm,08 à 11mm,54

Après un contact de vingt-quatre heures, la quantité enlevée était:

Pour l'eau distillée.	39mm,90
— de la Duna.	101mm,64
— du canal de la Duna. .	63mm,36

« Après l'essai, l'eau paraissait trouble, jaune ou verdâtre, et avait souvent une saveur d'encre. Cette saveur, due à l'oxydule dissous, disparaissait du reste aussitôt à l'air, par suite de la formation de l'oxyde.

« L'action de l'eau sur la fonte est donc extrêmement variable, et s'élève très-notablement par la présence des azotates. En même temps, on voit que le carbonate de soude, en donnant une réaction alcaline à l'eau, réduit notablement l'attaque. Dans certaines circonstances, d'ailleurs assez rares, probablement quand l'eau et le fer possèdent à la fois les conditions propres à une action chimique, il se forme par l'oxydation du fer des excroissances tuberculeuses qui peuvent devenir assez fortes, comme on l'a vu par exemple à Grenoble, pour réduire de moitié le débit de la conduite. Les dépôts rencontrés à Grenoble contenaient de l'oxydule et de l'oxyde de fer avec de l'acide carbonique, de l'eau, de la silice et du graphite. Ils se forment de préférence en certains points, beaucoup plus facilement sur la fonte grise que sur la fonte blanche, et, quand ces deux variétés de fonte existent à la fois, exclusivement sur la grise. Leur formation est facilitée par la présence du sel marin. Dans une dissolution saturée de chlorure de sodium et de carbonate de soude, étendue de 75 volumes d'eau aérée, l'oxydation se produit déjà au bout d'une minute (Payen). On n'a pas d'ailleurs cherché si l'azotate d'ammoniaque intervenait dans ces formations, parce qu'on ne connaissait pas à cette époque son action. Dans le sol de Paris, les tuyaux en fonte se rouillent très-vite, probablement par suite de la prédisposition de ces terrains à donner des nitrates. Dans d'autres cas, des conduites ont été retrouvées au bout de deux cents ans parfaitement intactes.

« Comme la rouille et les dépôts ferrugineux n'atteignent que très-rarement des proportions nuisibles, on néglige, en général, de prendre aucune précaution contre ces sortes d'altérations, ou bien l'on se borne à enduire le tuyau, avant la pose, d'un lait de chaux. On devrait de préférence, et bien que cette opération entraîne plus de travail et plus de frais, peindre l'intérieur du tuyau fortement chauffé, soit avec de l'huile de lin, soit avec du goudron. »

Dans une note, insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées de* 1851, M. l'ingénieur Gaudin a étudié les obstructions tuberculeuses des conduites d'eau de Cherbourg, et a décrit un appareil dont il s'est servi pour enlever les tubercules et nettoyer les tuyaux. Cet appareil est comme un hérisson à pointes de fer que l'on fait aller et venir dans les conduites et qui en râcle l'intérieur. On imaginera facilement une disposition analogue.

Action de l'eau sur les conduites en plomb. — Il a été entrepris dans ces derniers temps, à Paris, une véritable croisade contre les tuyaux en plomb qui, prétendait-on, sont attaqués par l'eau et la rendent impropre à l'alimentation en la chargeant de sels vénéneux.

L'éminent directeur des eaux de Paris a examiné la question dans diverses notes qu'il a présentées à l'Académie des sciences.

Depuis des siècles, le plomb est employé à la confection des conduites sans qu'on ait signalé d'accidents sérieux; une si longue expérience est déjà une présomption d'innocuité.

Les conduites publiques sont presque entièrement en fonte ou en tôle bitumée; c'est surtout dans les branchements particuliers que le plomb est mis en œuvre; leur longueur totale peut être évaluée à 1,500 kilomètres.

Dans tous ces branchements, l'eau ne séjourne au plus que six à neuf heures, à moins qu'il ne s'agisse de maisons inhabitées.

La surface intérieure des tuyaux en plomb, quelque anciens qu'ils soient, est toujours parfaitement lisse et recouverte d'une patine adhérente qui empêche le contact du métal et de l'eau.

Le plomb, plongé dans de l'*eau distillée*, est, comme la chimie nous l'enseigne, attaqué avec une excessive rapidité; il se forme en quelques instants une quantité de petits cristaux blancs d'hydrate d'oxyde de plomb qui se précipite, et l'acide sulfhydrique détermine dans la liqueur un abondant précipité noir de sulfure de plomb.

Mais, dès que l'eau n'est plus chimiquement pure et qu'elle renferme des parcelles de sels minéraux, elle n'attaque pas le plomb. La présence des sels de chaux, même à dose minime, est très-efficace; en l'absence de la chaux, d'autres sels paraissent aussi capables de protéger le plomb à la dose de $0^{gr},1$ par litre; tels sont le sulfate de soude, les chlorures de sodium et de potassium, le sulfate de magnésie.

Une eau très-pure, comme celle du puits de Grenelle qui ne marque que 8° ou 10° à l'hydrotimètre, n'attaque pas le plomb.

L'eau de pluie ne l'attaque sérieusement que si elle a été recueillie, non pas au commencement de la pluie, mais en quelque sorte après un lavage prolongé de l'atmosphère.

Il serait donc imprudent de laisser circuler et séjourner de l'eau pluviale dans des vases ou conduites en plomb.

En réalité, les eaux ne peuvent être considérées comme réellement inoffensives que lorsqu'elles renferment des sels calcaires : c'est le cas général; cependant certaines eaux de drainage peuvent ne renfermer que des nitrates; l'attaque du plomb se produit alors et l'empoisonnement est à redouter.

Il faut éviter de mettre en contact direct le plomb et le fer en présence de l'eau, parce qu'il se forme un couple voltaïque, capable d'activer la réaction chimique.

Les analyses très-précises semblent montrer, en définitive, que l'eau qui circule dans les conduites en plomb, finit par enlever à la longue une certaine partie du métal, si celui-ci ne se trouve point protégé, ce qui est le cas ordinaire,

par une patine adhérente ; mais la proportion de plomb est tellement faible en général qu'elle est sans danger pour la santé publique.

Si l'eau n'est pas trop chargée de matières organiques, si elle ne séjourne pas trop longtemps dans les tuyaux, elle ne peut devenir nuisible.

D'après le chimiste Schwartz, on pourrait défendre les tuyaux en plomb contre l'oxydation, en les plongeant pendant 15 minutes dans une solution concentrée de foie de soufre : le plomb se recouvre d'une sorte de vernis adhérent qui met le métal à l'abri du contact de l'eau.

2° APPAREILS ACCESSOIRES DES CONDUITES. ROBINETS. VENTOUSES

Les appareils accessoires des conduites principales sont les robinets et les ventouses.

Il existe deux genres de robinets au point de vue des fonctions : ce sont les robinets d'arrêt, destinés à isoler du réseau une conduite quelconque, que l'on veut mettre en chômage pour une raison ou pour une autre, et les robinets de décharge destinés à permettre la vidange des conduites.

Les robinets les plus en usage sont les robinets à boisseau et les robinets vannes;

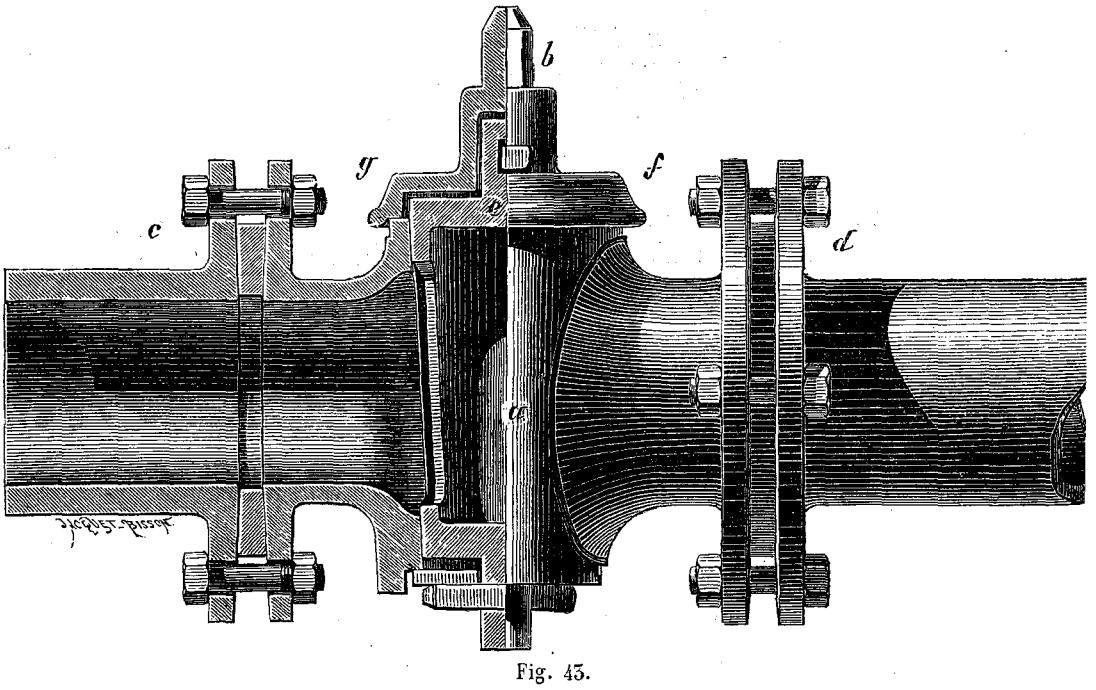

Fig. 43.

les premiers conviennent aux conduites de petit diamètre et les seconds aux conduites de grand diamètre.

Robinet à boisseau. — Le robinet à boisseau, est bien connu; il est représenté par la figure 43, moitié en élévation, moitié en coupe longitudinale. Il est placé sur un bout de tuyau droit, terminé par des brides *c* et *d* qui s'assemblent avec les brides des deux portions de conduites à réunir. Le boisseau (*a*) est un tronc de cône percé de part en part d'un orifice égal à celui des conduites; si cet ori-

fice est dans l'axe des conduites, la communication est établie; si, au contraire, on le tourne de 90° la communication est interceptée.

Pour imprimer au boisseau son mouvement de rotation, on se sert d'une clef, d'un système identique à celui de la clef de montre, qui s'engage dans le mamelon *e* à section carrée. — Le robinet est, comme nous savons, à une certaine

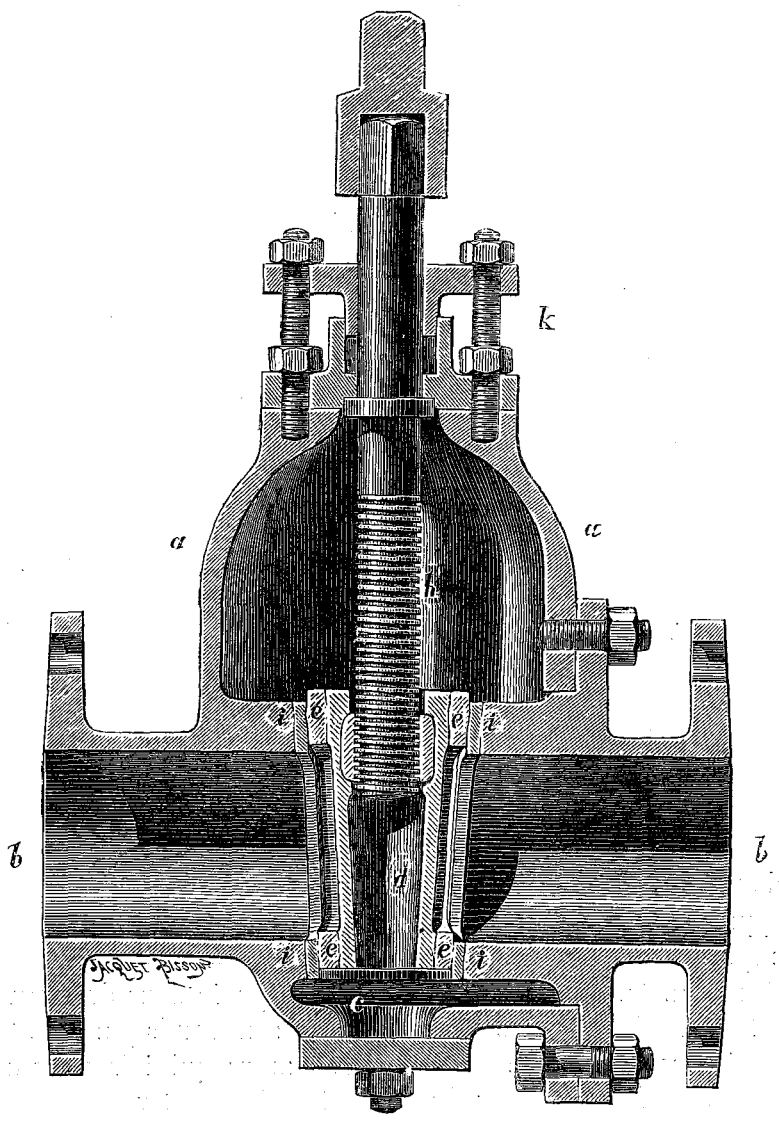

Fig. 44.

profondeur sous terre; on le manœuvre avec une clef qui s'introduit dans un manchon cylindrique en bois, fermé par un tampon de fonte au niveau de la voie publique.

La clef avec sa longue tige en fer est très-pesante; si elle agissait de tout son poids sur le robinet (*a*), elle le presserait énergiquement contre les parois de sa boîte, le frottement serait considérable et la manœuvre pourrait devenir difficile. On évite cet inconvénient au moyen du chapeau en fonte *bgf*, qui entoure le carré *e* et lui communique le mouvement de rotation que la clef lui imprime par le carré *b*; ce chapeau repose par sa base *gf* sur le sommet de la boîte du robinet et non sur le robinet lui-même; celui-ci n'est donc soumis à aucun effort vertical et obéit sans peine au mouvement de rotation. Les figures 1 et 2 de la

planche 13 représentent le dispositif complet d'un robinet d'arrêt, système Fortin-Hermann, établi pour la ville de Paris.

Robinet vanne. — Le robinet vanne est aujourd'hui d'un usage général pour les conduites d'un diamètre un peu fort; cependant, il s'applique bien aussi aux conduites de faible diamètre. La boîte du robinet vanne est en fonte et se compose de trois parties principales qui s'assemblent au moyen de brides; les faces d'assemblage sont aplanies au tour et enduites de minium pour assurer leur étanchéité, fig. 44.

La partie supérieure est composée d'une calotte sphérique *a a* où se loge la vanne quand elle est levée. Les deux autres parties sont des portions de tuyaux à brides *b, b* dans lesquels on a ménagé les coulisses et le siége nécessaires pour recevoir la vanne. Le système de boîte permet de visiter le robinet en enlevant simplement la calotte supérieure, il est dû à M. Herdevin. La partie inférieure *c* est munie d'une tubulure fermée par un disque assujetti par des boulons; on l'ouvre de temps en temps pour enlever les ordures, que l'eau entraîne dans la tubulure.

La vanne *d* est formée de deux disques fondus ensemble et réunis par leur face latérale et par leur partie supérieure. Les parois planes de ces disques sont légèrement inclinées sur la verticale; elles portent sur leur pourtour de légères saillies de $0^m,04$ à $0^m,05$ de largeur, correspondant à la paroi cylindrique du tuyau lorsque la vanne est fermée. Sur ces saillies parfaitement dressées on fixe, avec des vis en bronze à tête fraisée, des cercles de bronze *ee* de 8 à 10 millimètres d'épaisseur que l'on dresse également avec le plus grand soin. Les parois correspondantes de la boîte sont munies de cercles pareils *ii* et c'est par leur intermédiaire que le contact a lieu.

Cette vanne est guidée, dans son mouvement de levage ou de descente, par deux oreilles saillantes sur ses faces latérales qui glissent dans une coulisse ménagée pour elles et venue de fonte dans les parois de la boîte.

Cette coulisse est cachée sur la figure par la projection de la tige. Celle-ci *h* est en bronze; elle traverse un écrou de même métal logé dans le dessus de la vanne, et d'autre part une boîte à étoupe *k*, logée dans la partie supérieure du dôme de l'appareil; une rondelle, engagée dans une rainure au-dessous du stuffing box, empêche tout mouvement vertical de cette tige.

A Paris, les robinets, au-dessus de $0^m,08$, sont posés dans des regards en maçonnerie de 1 mètre de diamètre au moins, s'ils sont ronds, ou de $0^m,90$ de côté s'ils sont carrés; ces regards sont formés de murs qui laissent un intervalle libre de $0^m,40$ à $0^m,50$ au-dessous du robinet et s'élèvent verticalement jusqu'à $0^m,70$ au-dessous du pavé. A cette hauteur naît une voûte en arc de cloître dont le sommet est percé d'une ouverture de $0^m,65$ de diamètre; celle-ci est fermée par une trappe en fonte posée sur un châssis en bois.

Les robinets plus petits, sont posés dans un espace nommé tabernacle, formé de petits murs en briques posées sans mortier de $0^m,22$ de côté en carré sur $0^m,30$ de hauteur. Le tabernacle est recouvert d'une planche en chêne goudronné ou en bois blanc injecté au sulfate de cuivre. Sur cette planche, percée d'un trou rond de $0^m,081$ de diamètre, s'élève un tuyau de bois ou de fonte fermé par un tampon enchaîné. Cet appareil constitue ce que l'on nomme une bouche à clef.

Un premier avantage du robinet vanne est de donner une fermeture hermétique : il est beaucoup plus facile de dresser exactement une surface plane qu'une surface conique comme celle du robinet à boisseau.

Un second avantage du robinet vanne est qu'il s'ouvre et se ferme lentement; il permet de rétrécir à volonté le passage et, grâce à sa marche progressive, il évite les coups de bélier, si dangereux dans les grosses conduites avec les fortes charges. Généralement le pas des vis est de $0^m,01$, de sorte que la vanne s'élève ou s'abaisse d'un centimètre à chaque tour de clef.

La figure 3, de la planche 13, représente le robinet vanne du système Fortin-Hermann. L'orifice d'amenée du tuyau à intercepter, est garni d'un siége en bronze *a*; la vanne *c* est elle-même garnie d'un siége en bronze *b* qui vient au contact du précédent. La vanne se meut verticalement le long de la vis *d*; lorsque l'orifice est ouvert, la vanne se loge dans l'espace *e* au-dessous de la conduite, et lorsqu'on veut arrêter le courant, on tourne la clef de la vis en sens contraire, la vanne remonte lentement, elle finit par être arrêtée par le galet *f*; à ce moment l'obturation est complète. Ce système ménage la hauteur et permet de pouvoir toujours placer un robinet là où l'on place une conduite, tandis qu'avec la chambre de la vanne située au-dessus de la conduite, on n'a pas toujours la hauteur suffisante pour installer un robinet.

Les corps étrangers qui peuvent circuler dans la conduite, n'interrompent pas le fonctionnement d'un robinet; elles tombent dans la chambre *e* et la tubulure tangentielle *g* permet de les enlever.

La bouche à clef a la forme ordinaire : la partie supérieure *h* est indépendante du tuyau vertical *i* de sorte qu'on peut remanier la chaussée sans toucher au système et sans avoir besoin de couper des tuyaux.

La figure 4 représente un robinet vanne muni d'un indicateur *k* qui indique de combien l'orifice est ouvert.

Robinet à clapet en caoutchouc. — Sur le réseau à basse pression des conduites de Saint-Étienne, M. l'ingénieur de Montgolfier a employé des robinets du système Bonin, figure 45; ils se composent de deux clapets *a*, *a* garnis de caoutchouc, mobiles autour des points *cc* et reliés par deux tiges articulées à un manchon taraudé *b* qui se meut le long d'une vis verticale, manœuvrée de l'extérieur par une clef comme la tige du robinet vanne. La vis est fixe et son écrou est mobile, de sorte qu'il entraîne les clapets dans son mouvement; ceux-

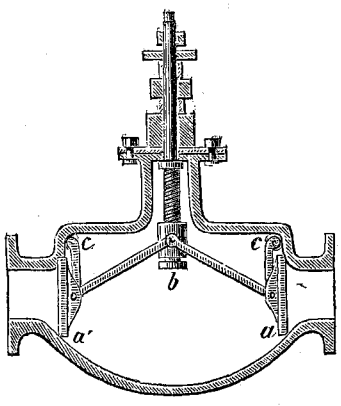

Fig. 45.

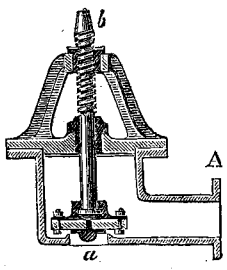

Fig. 46.

ci s'appliquent sur deux sections obliques, d'un diamètre égal à celui des portions de conduite qu'il s'agit de réunir.

Ces robinets, dont le prix est inférieur d'un $\frac{1}{5}$ à celui des robinets Herdevin ont, suivant M. de Montgolfier, donné d'excellents résultats à Saint-Étienne.

Clapet ou robinet de décharge. — Aux points bas des conduites on doit,

avons nous dit, placer des robinets ou clapets de décharge, permettant de mettre en vidange les sections correspondantes de la conduite.

La figure 46 représente la coupe d'un clapet de décharge de la distribution d'eau de Saint-Étienne, clapet fourni par les usines de l'Horme. Latéralement à la conduite principale, on place, au moyen d'un assemblage à brides, l'appareil A; l'orifice d'évacuation est fermé par une plaque horizontale en fonte *a*, garnie en dessous de caoutchouc vulcanisé; le caoutchouc s'appuie sur le rebord saillant de l'orifice; il est comprimé à volonté par la vis *b* qui se manœuvre par une bouche à clef; cette vis mobile passe dans un écrou fixe que supporte un siége en fonte, coulé en même temps que la tubulure; la tige de la vis traverse le couvercle de cette tubulure dans un stuffing box. On comprend que le caoutchouc se moule exactement sur la surface contre laquelle il est comprimé et détermine une obturation parfaite.

Le clapet étant, du reste, placé dans une tubulure latérale de la conduite principale, ne gêne en aucune façon l'écoulement. A la suite de l'orifice d'écoulement, se trouve un aqueduc qui mène les eaux soit à l'égout, soit dans un puisard absorbant.

Il va sans dire, qu'il est inutile d'adopter de grands diamètres pour les clapets de décharge ; ils n'ont jamais à livrer passage qu'à un volume d'eau relativement restreint, et il importe peu que le temps de la vidange dure quelques secondes de plus ou de moins.

A Saint-Étienne, on n'a adopté pour les orifices de vidange que deux diamètres : $0^m,135$ et $0^m,081$.

Les appareils coûtaient à l'usine.. . . .	75 et 60 francs.
Et tout posés à Saint-Étienne..	83 et 66 —

Ventouses. — Les ventouses sont des appareils placés aux points hauts d'un réseau de conduites et destinés à livrer passage à l'air contenu dans les tuyaux, lors de la mise en charge, ainsi qu'au mélange gazeux que l'eau pourrait abandonner à l'intérieur des conduites.

En Italie, on se servait de cheminées ou tubes verticaux qui s'élèvent à un niveau supérieur à celui de la source; l'équilibre hydrostatique s'établit et il n'y a pas à se préoccuper de l'émission de l'air qui se fait naturellement. Mais un pareil système est bien génant dans les villes et devient inapplicable lorsque la charge est grande. La gelée dans nos climats serait un grave inconvénient.

Bélidor recommandait de prendre comme ventouse une soupape pesante, placée à l'extrémité d'un court tuyau vertical; lorsque l'air se trouve suffisamment comprimé, il soulève la soupape et s'échappe.

On peut recourir à un simple robinet que l'on ouvre lorsqu'on met la conduite en charge et que l'on ferme quand l'eau y apparaît; ce procédé simple a l'inconvénient de n'être pas automatique; il peut entraîner de sérieux inconvénients.

Aujourd'hui, on ne se sert que de la ventouse à soupape, représentée par les figures 5 et 6 de la planche 9; elle a été inventée par le chevalier de Bettancourt, et appliquée pour la première fois par Girard. Elle consiste en une boule creuse en laiton, enfermée dans une chambre au sommet d'une tubulure verticale, placée au point voulu de la conduite; cette boule a sensiblement la densité de l'eau, de sorte qu'il ne faut pour la soulever, lorsqu'elle est noyée, qu'un faible effort. Elle est surmontée d'une tige verticale qui se termine par un clapet tronc co-

nique en bronze, d'environ $0^m,05$ de diamètre ; en remontant, ce clapet pénètre dans un orifice égal ménagé dans le couvercle de l'appareil, l'obturation se produit et toute communication est interrompue entre l'intérieur de la conduite et l'atmosphère.

Lorsqu'on met la conduite en charge, la boule creuse est entourée d'air, elle retombe sur son siége et laisse passer l'air qui s'échappe autour d'elle ; quand l'eau arrive, la boule est noyée, elle éprouve une poussée à peu prés égale à son poids et la pression de l'eau sur le clapet fait remonter la boule et le clapet qui ferme l'orifice d'émission.

Le mouvement se répète toutes les fois que l'air s'accumule dans la tubulure et que la boule cesse de plonger dans l'eau.

A Saint-Étienne, les ventouses ont toutes été posées sur tubulures de $0^m,135$, et ont coûté 70 francs pièce.

Il est à remarquer que la présence des ventouses est rarement utile, car on trouve, à presque tous les points hauts des conduites, soit une borne-fontaine, soit une bouche sous trottoir, et ces orifices suffisent pour l'évacuation de l'air.

La ventouse que nous venons de décrire est vraiment efficace pour la mise en charge, mais elle ne l'est pas autant pour l'émission de l'air qui peut se dégager de l'eau des conduites et s'accumuler dans les tubulures; cet air se comprime à la pression que représente la charge de l'eau au point considéré, et il peut arriver que la pression exercée par l'air comprimé sur la face inférieure du clapet soit supérieure à la force verticale qui tend à faire tomber la boule lorsqu'elle n'est plus complétement noyée.—Pour être certain que l'effet se produit, il faudrait calculer le diamètre du clapet obturateur et le volume de la boule d'après la valeur de la charge.

C'est ce que Darcy a remarqué.

Du reste, ajoute-t-il, lorsque l'on regarde attentivement couler une borne-fontaine, on s'aperçoit, aux fréquentes crépitations qui se produisent, que l'eau jaillissante entraîne beaucoup de globules d'air dans son mouvement. Je crois donc, en ce qui concerne, bien entendu, l'air tenu en suspension dans l'eau, que les conduites en sont presque radicalement purgées par les écoulements qui s'opèrent aux fontaines et aux bornes-fontaines ; que, dans ce cas, les tuyaux ouverts, les soupapes chargées d'un poids et les soupapes à flotteur n'ont qu'une action assez faible; qu'en un mot leur utilité principale n'existe qu'au moment de la mise en charge des conduites.

Prix des robinets et ventouses. — Voici quelques renseignements sur les prix des diverses espèces de robinets :

1° DISTRIBUTION D'EAU DE DIJON.

Diamètres.	$0^m,35$	$0^m,216$	$0^m,19$	$0^m,162$	$0^m,135$	$0^m,108$	$0^m,081$
Prix des robinets vannes.	$819^f,10$	$493^f,50$	$485^f,45$	$385^f,50$	$344^f,65$	$244^f,80$	$191^f,90$

Diamètres.	$0^m,108$	$0^m,081$	$0^m,06$
Prix des robinets à boisseau.	$278^f,50$	$184^f,20$	114^f

Prix de revient d'une ventouse. . . . . $89^f,55$.

Les prix sont actuellement beaucoup moins élevés.

2° DISTRIBUTION D'EAU DE SAINT-ÉTIENNE.

Prix et poids des robinets vanne Herdevin

DIAMÈTRE DES ORIFICES	ÉCARTEMENT ENTRE LES BRIDES	DIAMÈTRE DES BRIDES	HAUTEUR DU ROBINET	POIDS	PRIX	
					A L'USINE, A PARIS	POSÉ A St-ÉTIENNE
mètre	mètre	mètre	mètre	kil.	fr.	fr.
0,50	0,90	0,695	1,60	1,160	1,020	1,150
0,30	0,68	0,475	1,20	450	515	610
0,25	0,58	0,410	1,00	290	386	470
0,216	0,52	0,380	0,92	230	340	410
0,19	0,49	0,355	0,88	195	285	345
0,135	0,42	0,290	0,70	120	200	250
0,108	0,39	0,250	0,65	100	170	210
0,081	0,30	0,230	0,50	49	125	160
0,054	0,24	0,180	0,35	31	65	76

Les robinets à clapets, système Bonin, coûtaient 20 pour 100 de moins.

Prix d'un clapet de décharge tout posé de $0^m,135$ de diamètre. . . . 83 francs.
— $0^m,081$ — . . . . 66 —
Prix d'une ventouse toute posée. . . . . 70 —

3° DISTRIBUTION D'EAU DE LILLE

1° Prix des robinets vannes d'arrêt

DIAMÈTRE	PRIX	ENTRETIEN 1re ANNÉE	ENTRETIEN 2e ANNÉE	ENTRETIEN COURANT ANNUEL	DIAMÈTRE	PRIX	ENTRETIEN 1re ANNÉE	ENTRETIEN 2e ANNÉE	ENTRETIEN COURANT ANNUEL
mètre	fr.	fr.	fr.	fr.	mètre	fr.	fr.	fr.	fr.
0,60	820	5,00	5,00	10,00	0,20	200	1,75	1,75	3,50
0,50	630	4,00	4,00	8,00	0,15	150	1,50	1,50	3,00
0,40	460	3,00	3,00	6,00	0,125	125	1,00	1,00	2,00
0,30	310	2,50	2,50	5,00	0,10	95	1,00	1,00	2,00
0,25	250	2,00	2,00	4,00	0,075	70	1,00	1,00	2,00

Le prix d'entretien comprend aussi les frais de manœuvre.

Pour loger les principaux robinets, on a exécuté des regards en maçonnerie, qui ont coûté chacun 125 francs; il faut donc ajouter ce chiffre aux nombres précédents.

2° Prix des robinets de décharge (boisseau).

Diamètre. 0m,20 prix 200 fr. Diamètre. 0m,125 prix 125 fr. Diamètre. 0m,075 prix 70 fr.
— 0m,15 — 150 — 0m,10 — 95 — —

Prix d'une ventouse. . . . . 140 francs.

4° DISTRIBUTION D'EAU DE LYON

		KILOG.		FRANCS.
Robinets d'un diamètre de.	0m,60. . .	poids. . . 6,300. . .	prix. . .	1,335
—	0m,50. . .	— . . . 5,025. . .	— . . .	1,070
—	0m,40. . .	— . . . 3,700. . .	— . . .	795
—	0m,35. . .	— . . . 3,100. . .	— . . .	668
—	0m,30. . .	— . . . 2,550. . .	— . . .	551
—	0m,25. . .	— . . . 2,300. . .	— . . .	490
—	0m,108. . .	— . . . 1,000. . .	— . . .	300
—	0m,08. . .	— . . . 825. . .	— . . .	178

Le prix comprend la fourniture et la pose.

Les ventouses avaient un poids de 375 kilogrammes; elles ont été fournies au prix de 20 francs les 100 kilogrammes.

Le prix de la pose a été de 8 francs.

Le prix total d'une ventouse mise en place a été de 83 francs.

5° APPAREILS DE DISTRIBUTION PUBLIQUE

Les appareils de distribution publique ont deux fonctions distinctes : 1° l'arrosage des rues et accidentellement l'alimentation des pompes à incendie; 2° l'alimentation publique.

Certains constructeurs se sont surtout préoccupés de la première de ces fonctions et ont placé les appareils de distribution de manière à arroser la plus grande surface possible de la voie publique.

C'est là, en somme, une fonction secondaire, quand on la compare aux besoins domestiques.

De la multiplicité des bornes-fontaines. — On doit chercher principalement à mettre l'eau à la portée de tous, surtout dans les quartiers où se trouve agglomérée la population ouvrière.

« Le lavage des rues, disait M. Emmery, inspecteur général des ponts et chaussées, est sûrement bien utile; mais consultez les hommes de l'art, reprenez tous les procès-verbaux des commissions sanitaires, et ils vous diront qu'il est bien autrement important de laver les allées des maisons, les petites cours intérieures mal aérées, les lieux d'aisances qui y sont ordinairement placés, les rez-de-chaussée. Ils ajouteront qu'il faut surtout donner à la classe malheureuse la possibilité de multiplier gratuitement les lavages de toute espèce, soit du corps, soit du linge qui souvent se trouve réparti en si faible proportion à chaque individu. Voilà, vous répéteront-ils, comment vous attaquerez avec quelque profondeur la question de l'assainissement intérieur d'une grande ville. Tel est le service immense que rendent les puisages gratuits aux bornes-fontaines. »

Ces principes ne doivent pas être perdus de vue lorsqu'on projette une distri-

bution d'eau; sans doute, la multiplicité des bornes-fontaines pourra nuire dans les premiers temps aux abonnements privés, mais cet inconvénient ne durera pas, et la distribution d'eau à domicile offre tant d'avantages que les propriétaires assez riches pour l'installer arriveront un jour ou l'autre à le faire.

Les appareils de distribution publique comprennent :

1° Les bornes-fontaines;

2° Les bouches sous trottoirs, pour arrosage ou pour alimentation des pompes à incendie;

3° Les poteaux d'arrosage;

4° Les fontaines publiques et jets d'eau.

1° **Bornes-fontaines.** — Les figures 6 de la planche 13 représentent la borne-fontaine à repoussoir de la ville de Paris.

Un tuyau en plomb de 27 millimètres de diamètre intérieur, amène les eaux de la conduite principale.

Cette soupape est destinée à ouvrir et à fermer alternativement l'orifice qui laisse passer l'eau dans l'ajutage extérieur *m* de la borne.

La soupape *e* est placée au bas d'une tige verticale qui se termine à l'extérieur et au sommet de la borne par un bouton *f*.

La course de la tige verticale est limitée d'un côté par l'écrou *n*, de l'autre par le tampon *i*; l'écrou *n* est mobile et, en le relevant, on peut maintenir la soupape un peu au-dessous de son siége et obtenir un écoulement continu.

Dans le cas de l'écoulement discontinu, l'obturation est assurée par le levier *p* muni du contre-poids *g*; ce levier tend à soulever la tige verticale; il maintient la soupape sur son siége et concourt ainsi à l'effet de la pression de l'eau.

Une porte à clef *q*, située à la partie supérieure de la borne, permet de visiter et de régler le robinet à volonté.

Cet appareil est simple, solide et peu sujet à dérangement.

L'égout de l'ajutage *m* tombe dans une cuvette recouverte d'une grille à barreaux, et la cuvette communique avec le ruisseau par une gargouille en fonte.

Lorsque la borne-fontaine est bien construite, les fuites ne sont pas à redouter; cependant, comme un faible suintement pourrait à la longue remplir la borne, ce qui l'exposerait à la rupture lors des gelées, il convient de ménager à la base de l'enveloppe en fonte un orifice d'évacuation pour les suintements.

Les figures 5 de la planche 13 représentent un système analogue, mais plus complet, établi par la maison Fortin-Hermann. — Le système ponr l'alimentation publique est le même; l'eau s'écoule par l'ajutage *m* lorsqu'on presse le bouton *f*. — Sur le côté est une soupape *r*, que l'on ouvre au moyen d'une clef introduite par l'orifice *x*; cette soupape ouverte, l'eau s'échappe en *s*, le courant s'écrase dans la coupelle *t* et tombe à la partie inférieure du coffre de la borne-fontaine, dans ce qu'on appelle le souillard, d'où l'eau s'en va directement au ruisseau par le chemin *uv*; cela permet à la borne-fontaine de remplir la fonction de bouche d'arrosage. — Elle remplit en outre la fonction de bouche d'incendie, car la coupelle *t* fait partie d'une porte latérale qu'on peut ouvrir; la tubulure *s* est alors libre, et comme elle se termine par un pas de vis, elle peut recevoir le raccord des tuyaux qui alimentent les pompes d'incendie.

L'appareil, ingénieusement disposé, répond donc aux trois grands besoins : l'alimentation privée, l'arrosage de la voie publique et la fourniture de l'eau nécessaire à l'extinction des incendies.

Prix des bornes-fontaines. — A Dijon, le prix de revient d'une borne-fontaine, tout compris, s'est élevé à 345 fr. 60.

A Lille, le prix des bornes-fontaines ordinaires, pose et fourniture, s'est élevé à 190 francs, et le prix des bornes-incongelables à 245 francs.

Le prix annuel d'entretien d'une borne-fontaine est fixé à 8 francs.

Les bornes-fontaines de Saint-Étienne, construites dans les ateliers de M. Flicoteaux, à Lyon, ont été payées, toutes posées, non compris le branchement en plomb, 164 francs, savoir :

Fourniture de la borne, de la cuvette et de la gargouille.	85 fr.
Prise d'eau complète du diamètre de 0m,027 avec robinet d'arrêt.. .	64
Pose de la borne-fontaine, faux frais, bénéfice.	15
Total égal. . . .	164

2° **Bouches d'arrosage.** — La figure 1 de la planche 12 représente une bouche sous trottoir de la ville de Paris ; c'est une coupe en travers, faite par un plan vertical transversal à la chaussée.

On voit en arrière du plan de la figure le tuyau en plomb *k* qui amène l'eau de la conduite principale et qui se recourbe normalement pour arriver au robinet d'arrêt R ; en avant de ce robinet vient le tuyau *ll*, qui alimente la bouche sous trottoir et qui se recourbe à angle droit pour prendre la direction verticale et venir s'assembler avec la bouche proprement dite.

n est la soupape qui, en se levant, livre passage à l'eau ; elle est guidée dans sa course par un étrier inférieur et par une vis supérieure ; celle-ci est mise en mouvement au moyen d'une clef qui s'emmanche sur le carré *n'*.

La soupape étant levée, l'eau pénètre dans la boîte *p* ; pour briser le courant et éviter toute projection du liquide, l'orifice supérieur de la boîte *p* est recouvert d'une cloche renversée *o*, qui rejette les eaux dans le couloir *q*, d'où elles gagnent le caniveau, fig. 2.

Le robinet d'arrêt R est manœuvré par la tige verticale *l'*, posée à demeure et terminée par le carré *s* qui se manœuvre au moyen d'une clef.

La bouche entière est recouverte d'une plaque en fonte dont la surface est formée de pointes de diamant : dans cette plaque *tu* sont ménagées deux portes dont on voit les charnières en *v* et *x*, qui ne s'ouvrent qu'avec des clefs.

Ainsi, la manœuvre consiste à ouvrir les deux portes en fonte, à tourner la tige du robinet d'arrêt avec une première clef à carré, et enfin à lever la soupape *n* avec une seconde clef à carré *n'*.

Lorsque le robinet d'arrêt demeure ouvert, on n'a qu'à agir sur le carré *n'*, auquel correspond un orifice libre de la plaque en fer *ut*, et il n'est pas besoin d'ouvrir les deux portes de cette plaque. La coupelle *o* permet de modérer à volonté le débit de la bouche ; en effet, en remontant ou en abaissant cette coupelle, on élargit ou on rétrécit l'orifice d'écoulement.

Les figures 3, 4, 5, de la planche 12 représentent une bouche d'arrosage carrée, avec prise d'eau de 0m,027 et raccord de 0m,041.

L'eau arrive, comme tout à l'heure, par un tuyau en plomb *l* de 0m,027 de diamètre dans une boîte *a*, fermée par une soupape tronc-conique *b* ; la tige verticale de cette soupape est filetée et traverse un écrou fixe, elle se termine en haut par un carré sur lequel agit la clef *c*, qui permet de lever la soupape ou de l'appuyer sur son siége. La soupape étant levée, l'eau s'échappe par la tubulure *t*, remplit la boîte en fonte *ef*, d'où elle s'épanche à l'extérieur ; le tuyau *u* sert à vider la boîte en fonte ou bien encore à conduire au caniveau l'eau, qui arrive dans cette boîte.

Mais, l'appareil n'est pas destiné à fonctionner de cette manière ; la tubulure *t* se termine par une vis, à laquelle on peut adapter l'extrémité d'un tuyau d'arrosage avec lance, ou bien un col de cygne *dd*, terminé par un robinet à soulèvement *r* ; la bouche peut servir alors à l'alimentation ordinaire ou à l'alimentation d'une pompe à incendie.

La boîte d'arrosage est fermée par une plaque de fonte *mn*, dont on voit la charnière en *n* ; cette plaque se ferme à clef, mais elle porte un orifice rond par lequel on peut introduire la clef qui manœuvre la soupape *b*, de sorte qu'on n'a besoin de lever la plaque que pour visiter l'appareil.

Bouche d'eau de Saint-Étienne. — « Les bouches d'eau de Saint-Étienne, dit M. de Montgolfier, sont circulaires et ont $0^m,20$ de diamètre. Elles renferment, sous un même couvercle en fonte, l'extrémité de la tige du robinet de prise d'eau qui se trouve à $0^m,80$ en contre-bas dans le sol, le robinet de service qui permet de régler le débit de la bouche et enfin, un raccord à incendie et à arrosage. Lorsque le robinet de prise est ouvert, la bouche est en charge, et, en ouvrant le robinet de service, l'eau s'écoule sur la chaussée par le tuyau en plomb, qui, partant de la bouche, traverse la bordure du trottoir. Pour arroser, on enlève le couvercle qui recouvre le raccord et l'on visse le tuyau d'arrosage. Tout le mécanisme de la bouche est enfermé dans une deuxième enveloppe en fonte, de sorte qu'il peut être démonté et retiré de cette dernière, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer de déblais, ni de toucher à l'asphalte ou au dallage du trottoir.

Les bouches sont payées, toutes posées, non compris l'embranchement de plomb, 109 francs, savoir :

Fourniture de la bouche complète.	99 francs.
Pose, réfection de l'asphalte ou du dallage, etc. . .	10 —
Total. . . .	109 —

Prix des bouches sous trottoirs et accessoires à Lille. — Voici quelques prix relatifs à la distribution d'eau de la ville de Lille :

Bouche d'eau sous trottoirs à deux raccords de $0^m,04$ pour incendie, y compris robinet d'arrêt, bouche à clef et pose.	140 francs.
— à un raccord.	80
Bouche à clef comprenant la fondation, la planche en chêne du tabernacle	15
Bouche d'arrosage de jardin, à simple raccord, sans robinet d'arrêt, pose comprise	35
Fourniture d'une clef de serrure de borne fontaine.	1.25
Lance avec robinet en cuivre rouge, pour arrosage.	50
Lance coudée avec robinet de prise d'eau en cuivre.	50
Raccord complet de $0^m,04$ de diamètre, en cuivre jaune.	10
Le mètre linéaire de tuyau en cuir cloué.	8
— en caoutchouc à deux plis de toile de $0^m,04$. . . .	8
Bouche à clef en fonte (système Fortin-Hermann) complète, pour robinets de tout diamètre, fourniture et pose.	18.50

3° **Poteaux d'arrosement.** — M. Mary, lorsqu'il dirigeait le service des eaux de Paris, a fait établir des poteaux d'arrosement, figures 1 à 4, planche 9, dont l'usage s'est répandu dans les grandes villes et qui sont destinés à remplir directement les tonneaux d'arrosage et les tonneaux des porteurs d'eau.

Ce sont des poteaux creux en fonte de $2^m,89$ de haut, hermétiquement fermés.

L'eau arrive à la base par un tuyau d'embranchement ordinaire et s'élève dans la cavité du poteau, en comprimant l'air qu'elle renferme. Au centre de cette cavité est un tuyau de 65 millimètres de diamètre, qui se termine en haut par un robinet à boisseau tronc-conique; ce robinet se manœuvre au moyen d'un carré et d'une clef qu'on introduit par le sommet du poteau. Lorsqu'il est ouvert, l'eau s'échappe par un ajutage et s'engage dans un tuyau flexible en cuir, la conduisant au tonneau qu'il s'agit de remplir. A $0^m,50$ environ au-dessus du sol, le poteau porte latéralement deux marches en fonte, sur lesquelles on peut monter pour atteindre facilement le sommet du poteau et manœuvrer le robinet La section d'écoulement est assez grande, et la masse liquide en mouvement assez considérable pour que les coups de bélier, qui résultent de la fermeture brusque du robinet, soient dangereux et compromettent la solidité dn tuyau; l'air emprisonné dans le poteau, autour du tuyau central, amortit les chocs et prévient les dangers. Le poteau joue donc tout à la fois le rôle de conduite d'eau et de réservoir d'air comprimé.

4° **Jets d'eau.** — Nous ne dirons rien des fontaines monumentales, elles sont plutôt du ressort de l'architecture. La fonte à bon marché permet aujourd'hui d'établir partout des vasques surmontées de statues et d'attributs. A défaut de cette forme ornementale, on peut se contenter de vasques en ciment, qui rendent de grands services et permettent d'établir à peu de frais des fontaines ou des abreuvoirs.

Le eaux jaillissantes font le plus bel ornement de nos promenades et des places publiques des grandes villes. On ne les établit qu'exceptionnellement, cependant, nous avons cru devoir reproduire ici la planche 11, empruntée à l'ouvrage de Darcy et représentant la gerbe jaillissante de la porte Saint-Pierre à Dijon.

Nous avons donné à la page 47 les calculs des jets d'eau verticaux. L'alimentation de la gerbe de la place Saint-Pierre se fait au moyen de deux tuyaux, figures 2, 3, 4. La conduite principale de $0^m,19$ de diamètre se bifurque en deux tuyaux égaux, qui se recourbent verticalement pour aboutir dans la boîte qui se trouve à la base de la gerbe.

Un des tuyaux, figure 4, alimente le jet central; ce tuyau est fermé par un obturateur qui ne laisse libre qu'un orifice de petit diamètre, par où le jet s'élance à une hauteur donnée par la formule de la page 48; nous rappellerons que la section de l'orifice du jet doit être faible, par rapport à celle du tuyau, afin de réserver toute la charge disponible pour imprimer à l'eau jaillissante sa vitesse ascensionnelle.

Le second tuyau dégorge dans la boîte en fonte qui entoure le précédent; il alimente plusieurs orifices percés en couronne sur le couvercle de cette boîte, orifices inclinés sur la verticale.

L'eau qui s'échappe de chacun de ces orifices décrit un jet parabolique, dont il est facile de calculer la hauteur et l'amplitude, en recourant à la formule du mouvement des projectiles.

Lorsqu'on lance un projectile avec une vitesse v, suivant une direction inclinée de l'angle α sur l'horizon, la courbe qu'il décrit est une parabole ayant pour équation (Voir notre *Traité de mécanique*, page 15) :

$$(1) \qquad y = x \operatorname{tang} \alpha - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{v^2 \cos^2 \alpha}$$

L'amplitude du jet s'obtient en faisant $y = 0$, elle est donnée par

$$x = \frac{v^2}{g} \sin.2\alpha \qquad (2)$$

La hauteur maxima du jet s'obtient en remplaçant, dans l'équation de la courbe, x par la moitié de l'amplitude précédente et on trouve :

$$y = \frac{1}{2}\frac{v^2}{g} \sin^2\alpha \qquad (3)$$

Étant donnée la charge, on calcule approximativement la vitesse v d'écoulement par un orifice en mince paroi ; connaissant le rayon du bassin, on a la valeur maxima de l'amplitude, il n'y a donc que l'inclinaison α d'inconnue dans l'équation (2), et cette équation permet de la calculer.

L'équation (3) fournit la hauteur du jet.

Avantages de petits orifices dans les jets d'eau. — Pour qu'un jet d'eau s'élève à une hauteur qui s'approche du niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation, il faut que l'orifice de ce jet soit de faible section, par rapport à la conduite qui y aboutit, afin que l'eau contenue dans celle-ci puisse être considérée comme sensiblement en repos.

Exemple : Soit un orifice situé à 10 mètres au-dessous de la surface du réservoir d'alimentation, la vitesse de l'eau qui s'échappe par cet orifice supposé en mince paroi est $\sqrt{2gh}$, ou environ 14 mètres à la seconde.

Mais la formule $\sqrt{2gh}$ admet que la vitesse d'écoulement de l'eau dans le réservoir et dans la conduite qui lui fait suite, est sensiblement nulle, par rapport à la vitesse du jet. Si l'extrémité de la conduite était ouverte sur toute sa section, au lieu de l'être sur une faible portion, le jet ne pourrait s'élancer avec une vitesse de 14 mètres que si toute l'eau de la conduite prenait elle-même une vitesse de 14 mètres. Or, une pareille vitesse développerait des frottements énormes et absorberait une partie considérable de la charge ; la hauteur du jet se trouverait donc réduite dans de bien grandes proportions.

Ainsi, il importe d'adopter pour les orifices des jets d'eau des sections inférieures à celle de la conduite alimentaire.

4° APPAREILS DE DISTRIBUTION PRIVÉE

Principes généraux. — On ne peut arriver à une distribution privée parfaite, qu'en s'imposant les règles suivantes :

1° L'eau doit arriver aux habitations pure et limpide ; l'usage des filtres domestiques a de grands inconvénients et se montre souvent inefficace ;

2° La distribution doit être permanente et non discontinue ; en Angleterre, la discontinuité est admise et il faut, à certaines heures, emmagasiner dans des réservoirs l'eau nécessaire aux besoins de la journée ; c'est, on le conçoit, une grave sujétion, et de plus l'eau risque de s'échauffer et de se corrompre ;

3° L'eau doit constamment arriver à tous les robinets avec une charge suffisante pour l'écoulement ; autrement, les avantages de la distribution d'eau deviennent illusoires et inspirent une fausse sécurité ; il faut donc disposer de

réservoirs assez élevés, pour que la charge ait partout une valeur convenable, bien que tous les orifices soient ouverts à la fois ;

4° L'eau doit arriver en tous les points où on a occasion de l'employer; il faut qu'en chacun de ces points on n'ait qu'à tourner un robinet pour obtenir l'eau dont on a besoin. Ainsi, en Angleterre, on trouve des robinets dans la cuisine, dans les lavabos, dans les cabinets d'aisance, etc.....

Ces quatre règles ne sont pas généralement observées; elles représentent un desideratum vers lequel on doit tendre. Malheureusement, elles entraînent à de grosses dépenses et on est forcé de se contenter souvent de l'à-peu près, qui, du reste, réalise dans bien des cas une amélioration incontestable. Ainsi, on se bornera, surtout dans les petites villes, à assurer l'arrivée de l'eau dans tous les rez-de-chaussée, parce qu'il serait trop coûteux d'établir des réservoirs suffisamment élevés.

Nous trouvons dans le rapport de M. l'ingénieur Huet sur l'Exposition de 1867 les renseignements suivants sur la distribution privée :

« L'Angleterre ne se préoccupe toujours que du service privé, et, à part quelques fontaines publiques pour puisage, on n'y trouve encore que la bouche à incendie.

« *Service privé.* — Paris, que nous avons déjà signalé comme un modèle, relativement à l'ampleur avec laquelle il a compris pour le présent, et prévu pour l'avenir, la question de son alimentation, se distingue encore par l'installation du service privé.

Dans les principales villes d'Angleterre et des États-Unis, ce service présente une importance bien plus considérable par suite d'habitudes qui ne pénètrent que lentement et difficilement parmi nous, mais son organisation n'y est pas comparable.

A Londres, rien de plus simple, mais rien aussi de moins satisfaisant. Le service ne se fait que successivement et par quartier, pendant deux heures sur vingt-quatre. Il faut pendant ce temps que chaque maison fasse son approvisionnement, remplisse son réservoir. L'approvisionnement se fait seul il est vrai, le trop plein s'écoule naturellement à l'égout; mais, si par suite de besoins exceptionnels le réservoir se vide avant la fin de la journée, il faut attendre au lendemain.

A Paris, le réseau complet de la distribution doit être constamment en service. Chaque maison a sa *prise d'eau* sur la conduite de la rue. L'établissement de cette prise se fait d'ailleurs régulièrement, aujourd'hui, en laissant la conduite en charge, à l'aide d'un collier dans lequel on visse le robinet, qui formera robinet d'arrêt et par l'œil duquel on perce la conduite. Un tuyau de plomb relie cette prise à la maison; sur ce tuyau et contre la façade de la maison se trouve le robinet jauge que précède un nouveau robinet d'arrêt, à la disposition de l'abonné.

La jauge est une lumière, qui est percée dans un obturateur en cuivre, et dont l'ouverture, faite par tâtonnements, résulte de la pression de l'eau au point considéré et du débit concédé en vingt-quatre heures. Avec le robinet de jauge, il faut un réservoir dans le haut de la maison pour emmagasiner l'écoulement continu. Le plus souvent la distribution est à robinet libre; c'est un forfait consenti avec l'abonné, en admettant une consommation de 45 litres par habitant, de 5 litres par mètre de cour ou de jardin, de 100 litres par cheval, de 100 litres par voiture.

Le système de *distribution par compteur*, séduisant en théorie, n'est pas ad-

mis à Paris. Il existe cependant de bons compteurs ; mais les meilleurs sont susceptibles de dérangements ; ils nécessitent un entretien très-suivi ; ils coûtent cher d'acquisition aux abonnés ; ceux qui sont basés sur la mesure d'une capacité, et présentent ainsi quelque garantie, occasionnent une perte de charge qui augmente rapidement avec le débit ; enfin tous exigent, de la part des compagnies, un contrôle coûteux de la consommation. A côté de ces inconvénients, on ne doit pas attendre du système de distribution par compteurs de grands avantages pratiques ; la consommation de l'eau est assez constante ; elle ne varie pas comme celle du gaz et l'abonnement à forfait est, en définitive, la solution pratique à laquelle on doit tendre.

En Angleterre, où le système de distribution par compteur est admis, il ne se développe pas, pour les mêmes raisons qui l'ont fait exclure du service de Paris ; à Glasgow, où l'on distribue l'eau à 100,000 familles, il y a 500 compteurs ; à Londres, la proportion est la même.

Entrée dans la maison, l'eau s'y élève par la conduite ascensionnelle en plomb et rencontre à chaque étage le distributeur, caisse en zinc avec trop-plein assurant l'écoulement à l'égout en cas d'accident. Une soupape à flotteur qui prévient *le coup de bélier* y introduit l'eau tangentiellement par la partie inférieure. Cet ensemble forme un système simple, d'un bon fonctionnement, facile à visiter, à entretenir.

Dans le cas de grandes masses d'eau en mouvement, le réservoir d'air est toujours le meilleur moyen de prévenir les coups de bélier ; mais cette solution n'a pu s'appliquer jusqu'ici à petite échelle dans la distribution intérieure de l'habitation ; l'air du réservoir est rapidement dissous et entraîné, et l'appareil ne fonctionne plus. On a eu l'heureuse idée d'obvier à cette difficulté en isolant l'air par une couche d'huile qui flotte à la surface et est recueillie, lorsque l'eau baisse et quitte l'appareil, dans une coupelle placée à la partie inférieure.

Nous ne dirons rien des appareils qui tendent à lutter contre le coup de bélier par l'élasticité du caoutchouc ; ils ne présentent généralement aucune durée, ni, par conséquent, aucune garantie sérieuse. »

Passons maintenant à la description de divers appareils en usage dans les distributions privées :

Prise d'eau à collier. — Les figures 3, 4 et 5, de la planche 10, représentent la prise d'eau à collier dont il est parlé ci-dessus, qui s'installe facilement tout en laissant la conduite en charge.

A est la conduite principale sur laquelle il s'agit de faire le percement. B est le branchement en plomb dont l'extrémité, refoulée en forme de bride, s'applique sur un cuir gras interposé entre elle et la conduite principale ; la bride en plomb est elle-même recouverte d'un cuir gras.

C est le collier qui porte un orifice pour le passage du branchement et dont les deux moitiés se rapprochent et se serrent au point voulu au moyen des écrous D.

Sur le tuyau de branchement B, on soude à l'avance le robinet d'arrêt, si bien qu'en ouvrant ce robinet, on peut faire passer la mèche destinée à percer la conduite A ; lorsque le percement est effectué, l'eau jaillit, on retire la mèche, on ferme le robinet d'arrêt et on termine le branchement.

Robinet de jauge. — Les figures 7, 8, 9, 10, 11, de la planche 9, représentent le robinet de jauge que l'on place sur le branchement en plomb des distributions particulières.

La coupe en travers montre que l'appareil se compose en réalité de trois ro-

binets; le robinet de jauge proprement dit est au milieu, les deux autres sont des robinets d'arrêts qui permettent de retirer de temps en temps la clef du robinet de jauge de son boisseau, et de la nettoyer.

L'entrée de l'eau dans le branchement particulier se fait par un petit trou, que l'on voit nettement sur la coupe en travers, et le diamètre de cet orifice est fixé par l'expérience, de manière à débiter au point où il est placé le volume d'eau concédé.

Ce petit orifice est précédé d'un grillage qui empêche l'introduction des ordures. Sur les carrés des trois robinets s'emmanche une barre de fer qui les rend solidaires et les maintient simultanément ouverts; cette barre de fer est fixée par un cadenas dont la clef reste aux mains de l'administration.

La figure 6, de la planche 12, représente un robinet de jauge de MM. Fortin-Herrmann.

Ce robinet de jauge, qui comprend le robinet d'arrêt *a* et le robinet de jauge proprement dit *b*, est enfermé dans une bouche à clef semblable, sauf les dimensions, à la bouche à clef ordinaire précédemment décrite.

Généralement, les robinets de jauge sont établis sur des tuyaux en plomb et reliés aux deux parties des tuyaux par des nœuds de soudure; on ne se servirait d'assemblages à brides que pour des tuyaux en fonte.

La manœuvre des deux robinets constituant l'appareil se fait au moyen d'une clef qui, d'un côté, porte un carré destiné à ouvrir ou fermer le robinet d'arrêt *a*, et, de l'autre côté, porte une douille à baïonnette permettant de manœuvrer le robinet de jauge et d'enlever la clef de ce robinet pour la nettoyer, faire disparaître les obstructions, vérifier ou modifier le trou de jauge.

Inconvénients du robinet de jauge. — Nous avons déjà signalé les inconvénients du robinet de jauge, qui nécessite la création d'un réservoir quelquefois considérable dans l'édifice qu'il alimente.

La constance de son débit suppose, en outre, la constance de la charge; celle-ci n'est jamais réalisée et, dans une grande distribution d'eau, la charge en un point donné peut varier de plusieurs mètres aux diverses heures de la journée; cela se conçoit, car le niveau du réservoir d'alimentation varie, et les pertes de charge en route sont nécessairement irrégulières.

Aussi le robinet de jauge donne-t-il trop d'eau pendant la nuit, et moins qu'il n'en faut pendant le jour; de là des réclamations.

Jauge piézométrique Chameroy. — Plusieurs appareils ont été inventés pour remédier à cet inconvénient. La figure 47 représente la jauge piézométrique Chameroy. L'eau arrive par la conduite forcée *a*, dans une cavité dont la partie centrale est occupée par un cylindre creux en fonte muni d'une fenêtre latérale *b*; dans ce cylindre est posé un appareil mobile composé d'un cylindre vertical *c* surmonté d'une tige verticale et d'un plateau horizontal *d*; celui-ci se meut dans un cylindre vertical *ee*, dont la section intérieure est supérieure à la section du plateau *d*, de sorte qu'il reste un intervalle annulaire libre entre ce plateau et le cylindre *ee*. Ainsi l'eau arrive en *a*, traverse la fenêtre *b*, passe dans le vide annulaire précité et gagne le tuyau *f*, qui l'emmène soit dans un réservoir libre soit dans une conduite.

La pression de l'eau s'exerce sous le plateau *d* et tend à le soulever; à l'origine elle le soulève en effet; mais, à mesure que le plateau s'élève, la fenêtre *b* se rétrécit, la perte de charge due à l'étranglement augmente sans cesse, la pression sous le plateau *d* diminue et l'équilibre finit par s'établir entre cette pression et le poids de l'appareil mobile *cd*. Ainsi, la pression dans l'espace *m* se

maintient constante, elle ne dépend que du poids de l'appareil ; cette pression étant constante ainsi que la surface annulaire qui donne écoulement à l'eau, le débit reste constant.

C'est la fenêtre *b* et l'appareil *c*, qui servent de régulateur automatique.

« Cet appareil, dit M. Belgrand dans une note insérée aux *Annales des Ponts et*

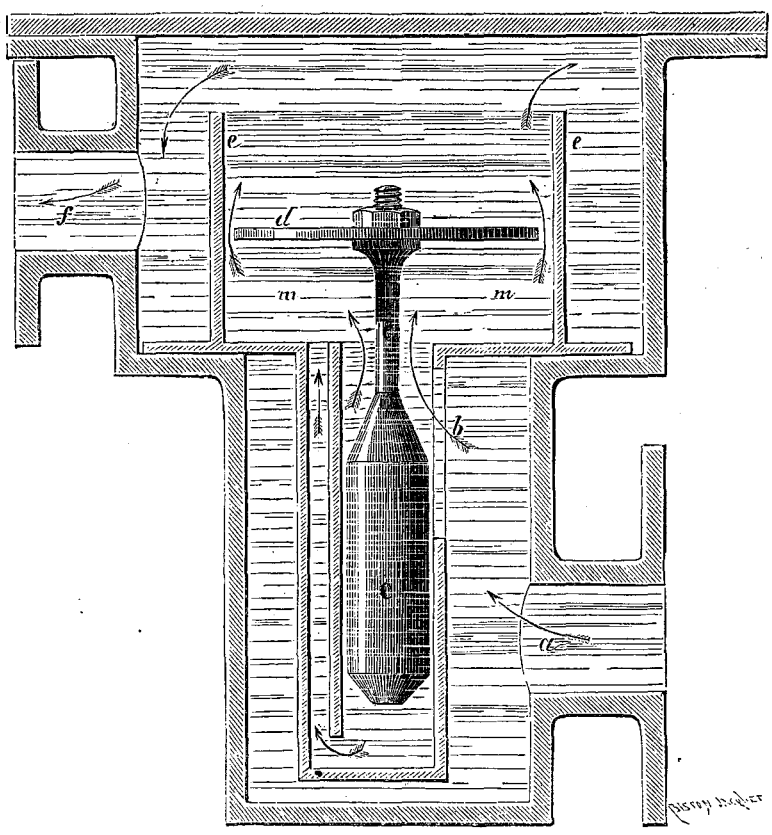

Fig. 47.

Chaussées de 1870, remédie aux inconvénients suivants des abonnements jaugés, inconvénients très-graves :

1° Il débite un volume d'eau constant sous des charges variables ; les abonnements jaugés donnent lieu à des plaintes continuelles dues à la variation de pression de l'eau dans les conduites.

2° Il rend impossibles les fraudes et les détournements d'eau. Par exemple, le réservoir qui reçoit l'eau d'un abonnement jaugé étant généralement placé dans les combles, l'abonné pique des tuyaux frauduleux sur la conduite qui relie le réservoir au robinet de jauge posé habituellement sous la voie publique. Avec la jauge de M. Chameroy, on peut piquer autant de tuyaux qu'on veut sur la colonne montante et le débit n'augmente pas.

Cet appareil fonctionne depuis un an dans nos ateliers de Chaillot, avec une régularité parfaite. Je l'ai fait marcher devant moi avec des charges qui ont varié de 1 mètre à 4 atmosphères, et le débit est resté constant. M. Chameroy prétend qu'il peut en fabriquer qui ne débiteront que 500 litres en vingt-quatre heures ; s'il réussit, il aura complétement résolu le problème. »

Alimentation intermittente des réservoirs. — Les branchements particuliers conduisent l'eau dans des réservoirs, qui sont munis d'un orifice de trop-

plein par où le liquide s'en va à l'égout lorsqu'il dépasse un certain niveau et menace de se répandre dans les appartements. Si le trop-plein fonctionne fréquemment, il en résulte une perte considérable pour l'entreprise des eaux. Il convient donc de disposer des appareils automatiques qui ferment le robinet d'alimentation lorsque le niveau de l'eau dans le réservoir est suffisamment élevé.

Les figures 6 et 7, de la planche 10, représentent deux appareils de ce genre.

Le premier se compose d'un robinet g, posé près de l'extrémité de la conduite; la clef de ce robinet est reliée par une tige en fer à un flotteur h, qui suit toutes les variations du niveau de l'eau dans le réservoir i; quand le flotteur a atteint une certaine hauteur, le robinet se ferme complétement.

Le second appareil est une soupape fixée à l'extrémité d'un levier du premier genre dont le grand bras se termine par un flotteur; on en comprend à première vue le mécanisme.

5° RÉSERVOIRS

Nous avons montré, au chapitre I, toute l'importance des réservoirs : ils constituent le régulateur, le volant d'une distribution d'eau. A chaque instant, ils emmagasinent la différence entre le volume de liquide amené et le volume consommé ou bien ils comblent le déficit entre l'apport et la consommation.

La consommation est essentiellement variable, l'apport est uniforme; qu'il s'agisse d'un aqueduc de dérivation ou de machines élévatoires, on peut sans doute en régler le fonctionnement de manière à proportionner la production à la consommation; mais on sait qu'il est toujours plus économique de faire marcher les machines à l'allure pour laquelle elles ont été construites, et qu'il vaut mieux faire porter la réduction sur la durée journalière du fonctionnement.

Ces considérations font bien sentir l'utilité, la nécessité des réservoirs, qui sont en outre destinés à parer aux chômages des sources d'alimentation.

Nous avons fait, au chapitre I, la théorie des réservoirs destinés à augmenter le débit momentané des conduites, des orifices alimentés par deux réservoirs, d'une conduite bifurquée alimentant deux réservoirs de niveau différent.

On trouvera dans le cours du volume la description du réservoir cylindrique d'Avallon, la description des réservoirs cylindriques de la porte Guillaume à Dijon, et du réservoir rectangulaire de Montmusard, ainsi que la description du réservoir à deux étages de Ménilmontant pour les eaux de la Dhuis. Nous compléterons ces notions par la description sommaire de quelques autres réservoirs.

Réservoir de Lyon. — La figure 7, de la planche 14, représente la coupe en travers du réservoir du moyen service à Lyon. La capacité de ce réservoir est de 600 mètres cubes. Il se subdivise en deux compartiments indépendants, qui peuvent néanmoins être mis en communication au moyen d'un robinet vanne.

Il est construit en maçonnerie de moellons et couvert par deux voûtes en plein cintre supportées par deux culées et par le mur de division du réservoir.

Le déversoir du trop-plein est à $4^{m},50$ en contre-haut du radier.

Réservoir d'Orléans. — Le réservoir précédent est presque tout entier enfoui

dans le sol, et sa construction ne donne lieu à aucune difficulté. Il n'en est pas de même des réservoirs aériens, surtout lorsqu'on les construit entièrement en maçonnerie.

Les figures 8 et 9 de la planche 14 représentent en coupe et en plan le réservoir d'Orléans construit par M. Mary. Le niveau de l'eau s'y élève à 13 mètres au-dessus du sol environnant.

Le réservoir repose sur un mur extérieur continu et sur cinq murs transversaux qui s'y rattachent à leurs extrémités où ils sont renforcés sur $3^m,70$. Ces murs et ces contre-forts sont reliés par des voûtes en plein cintre de $3^m,10$ de diamètre, qui sont extradossées horizontalement pour former le radier du réservoir ; elles ont $0^m,60$ d'épaisseur à la clef.

Le bassin supérieur, qui contient 5 mètres de profondeur d'eau, est renfermé entre quatre murs d'une épaisseur de 5 mètres à la base et de $0^m,60$ au sommet dont le parement extérieur a un fruit de $0^m,90$, tandis que le parement intérieur est décrit d'un arc de $7^m,60$ de rayon. Il est recouvert de voûtes plates en berceau reposant sur des piliers qui reposent eux-mêmes sur l'extrados horizontal des voûtes inférieures.

La poussée des voûtes est détruite autant que possible par des tirants en fer.

La pression qui s'exerce sur la maçonnerie ne dépasse pas $4^{kilogr},54$ par centimètre carré.

Au niveau supérieur des eaux, on a ménagé un déversoir de trop-plein, calculé de manière à pouvoir débiter, avec une charge de $0^m,05$ seulement, toute l'eau qui arrive au réservoir.

Réservoir de Dunkerque. — Le réservoir de Dunkerque, construit par M. Pauwels, affecte en plan la forme d'un rectangle de 53 mètres sur 13 mètres ; il contient 2,145 mètres cubes avec une hauteur d'eau de 4 mètres.

Il est divisé en trois compartiments dont les murs de séparation sont profilés de telle sorte qu'un des compartiments puisse être vide pendant que son voisin est plein.

Le réservoir proprement dit est supporté par un système de voûtes d'arête de $1^m,85$ de portée, reposant sur des piliers de $1^m,15$, lesquels s'appuient sur un massif de béton de $0^m,40$ d'épaisseur. Ce système de voûtes forme de grandes caves, très-utiles comme magasin pour le service des eaux.

Le réservoir proprement dit, recouvert par des voûtes en briques de $1^m,50$ d'ouverture, portées par des poutrelles en tôle reposant elles-mêmes sur des colonnettes en fonte de 3 en 3 mètres. Ces voûtes ont $0^m,40$ d'épaisseur y compris une chape de $0^m,06$ d'épaisseur et supportent le massif du cavalier des fortifications.

L'eau peut s'élever jusqu'à la naissance des voûtes en briques, c'est-à-dire jusqu'à une hauteur de 4 mètres.

Réservoir aérien en tôle. — Les réservoirs en maçonnerie deviennent très coûteux lorsqu'ils s'élèvent à une certaine hauteur au-dessus du sol ; les poussées latérales dues à la hauteur de l'eau dans l'étage supérieur se transmettent jusqu'au sol et agissent quelquefois avec un bras de levier considérable, de sorte qu'elles exigent l'emploi de gros massifs de maçonnerie.

Il est beaucoup plus économique de recourir à de grandes cuves métalliques à section circulaire ou rectangulaire, qui par elles-mêmes résistent aux poussées et n'agissent que par leur poids sur les murs qui les supportent. L'influence de la hauteur ne se fait pas trop sentir alors sur le prix d'établissement.

Avec ces cuves métalliques, il est facile d'arriver à une étanchéité parfaite

chose très-difficile, sinon impossible, avec des réservoirs en maçonnerie reposant sur des voûtes.

Il est vrai que les réservoirs métalliques exigent un entretien constant; cependant cet entretien n'est ni bien coûteux, ni bien difficile, si l'on a soin de laisser apparentes et d'un accès facile toutes les faces du métal.

A cet effet, ces faces doivent être à une certaine distance des parois extérieures de l'édifice, s'il en existe, et il convient de poser les cuves sur un plancher à claire-voie.

L'inconvénient des réservoirs métalliques est leur sensibilité à la température extérieure ; mais il est bien facile de remédier à cela ; il suffit d'entourer la cuve d'un mur ordinaire en maçonnerie, laissant entre elle et lui un certain espace vide et supportant une terrasse qui recouvre la cuve. Celle-ci se trouve ainsi à l'abri de la chaleur et des gelées. Si les gelées étaient à craindre, on pourrait en hiver garnir de paille le vide ménagé entre le mur et la cuve.

La cuve métallique repose sur un plancher formé de poutrelles en double T dont les bouts s'appuient sur deux murs en maçonnerie et qu'on soutient dans l'intervalle par des colonnes en fonte, si la portée l'exige ; le rez-de-chaussée du réservoir est complétement fermé et on l'utilise comme magasin.

On arrive, avec la tôle, à construire des réservoirs qui ne coûtent pas plus de 25 francs par mètre cube de capacité.

La forme circulaire est celle qui contient le plus grand volume sous la moindre surface; mais elle est d'exécution plus difficile que la forme rectangulaire, et, généralement, il y aura avantage à préférer cette dernière.

La forme circulaire ne peut se déformer; l'épaisseur de la tôle aux diverses hauteurs se calcule par la formule de la résistance des tuyaux, que nous avons donnée plus haut. Il faut se préoccuper aussi de l'effort tranchant vertical qui tend à séparer le fond du réservoir de ses parois latérales, à moins que le fond ne soit supporté par des poutrelles qui fractionnent la surface.

La forme rectangulaire est moins facile à calculer: on peut disposer à l'intérieur, au tiers de la hauteur de l'eau à partir du fond, des tirants horizontaux capables de résister à la poussée qui tend à écarter les faces opposées, et ces tirants permettent alors de réduire l'épaisseur des parois. Si l'on supprime ces tirants, il conviendra toujours d'entretoiser les faces opposées à leur partie supérieure, et on calculera chaque paroi latérale comme une poutre verticale fixée à ses deux extrémités et soumise à des efforts horizontaux proportionnels à la profondeur de l'eau; on devra s'assurer en outre que les efforts tranchants qui se produisent suivant les lignes d'intersection horizontales et verticales du fond et de toutes les faces trouvent une résistance suffisante.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur ces calculs dont nous avons donné tous les éléments dans notre *Traité des ponts métalliques*.

Résistance des réservoirs en maçonnerie. — De même, dans notre *Traité des ponts en maçonnerie*, aux pages 108 et suivantes, nous avons donné les formules et les méthodes graphiques permettant de calculer les dimensions des murs qui ont à soutenir des terres ou de l'eau.

Nous rappellerons sommairement les principes de ces calculs.

Soit un mur dont *abcd* est la section, figure 10, planche 14; considérons ce mur sur 1 mètre de longueur, il reçoit de l'eau une poussée horizontale Q appliquée au tiers de la hauteur h; cette poussée est combattue par le poids de la maçonnerie P, et la résultante R de ces deux forces coupe la base *cd* en un point *m*.

Soit o le milieu de la base cd : si le rapport $\left(\frac{om}{od}\right)$ est moindre que $\frac{1}{3}$, la pression maxima p par unité de surface que la maçonnerie supporte, est donnée par l'équation

$$p = \frac{P}{S}(1+3n)$$

dans laquelle P est le poids de la tranche de mur considérée, S la surface de la base de cette tranche et n le rapport $\left(\frac{om}{od}\right)$.

Si le rapport n est supérieur à $\frac{1}{3}$, la pression maxima par unité de surface est donnée par la formule :

$$p = \frac{P}{S}\frac{4}{3(1-n)}$$

Le point m est le centre de pression dans la base cd ; si nous considérons la section ef et que nous construisions la résultante de la poussée du liquide supérieur et du poids de maçonnerie qui surmonte ef, cette résultante coupe ef en un point qui appartient à ce que nous avons appelé en résistance la courbe des pressions.

La courbe des pressions est donc facile à construire ; en aucun point, elle ne doit sortir du massif de maçonnerie et on doit s'attacher à profiler le massif de telle sorte, qu'elle passe toujours au milieu des sections, car alors le rapport n est nul et dans chaque section horizontale la pression se trouve uniformément répartie.

Nous aurons lieu de revenir ultérieurement sur la détermination du profil des murs des grands réservoirs ; cette détermination n'a pas grande importance dans les réservoirs ordinaires de distributions d'eau.

Il y a avantage, au point de vue de la résistance, à profiler le mur en contact avec l'eau suivant une courbe parabolique ou suivant une série de redans, comme le montre la figure 11, planche 14. En effet, lorsqu'on cherche la résultante de la force de renversement Q et de la force de stabilité P, celle-ci se compose non seulement du poids du mur en maçonnerie, mais encore du poids d'un prisme de liquide ayant pour base la surface $hefgak$.

Mais, nous le répétons, nous n'insistons pas sur ces calculs qui seront plus amplement développés lorsque nous traiterons des canaux.

Généralités sur les réservoirs. — Il est évident que les réservoirs établis en déblai sont les meilleurs, les plus faciles à construire et les plus économiques. Ils doivent toujours être revêtus en maçonnerie; sans quoi il y aurait des filtrations et des végétations se développeraient à l'intérieur.

Toutes les fois qu'on trouvera un mamelon, un côteau dominant toute une ville, c'est là qu'il faudra établir son réservoir et on le fera en déblai.

Lorsqu'on établit une distribution d'eau de source, il convient de recourir à des réservoirs voûtés afin de conserver une des principales qualités de l'eau, la fraîcheur. S'il s'agit d'eau de rivière, il peut n'être pas indispensable de recouvrir les réservoirs, mais cette précaution est toujours préférable.

Dans tous les cas, il convient de ménager des cheminées d'aérage ; le renou-

vellement de l'air, ainsi que nous l'avons dit en parlant des citernes, empêche la putréfaction.

Les réservoirs aériens ne doivent guère être construits en maçonnerie que si leur hauteur ne dépasse pas 5 mètres au-dessus du sol ; au delà il sera généralement préférable de recourir aux cuves métalliques enveloppées dans un édifice en maçonnerie.

Du reste dans chaque cas on fera bien de dresser des projets comparatifs, avec des surfaces et des hauteurs d'eau variables, afin de rechercher le minimum de dépense.

CHAPITRE VII

ÉGOUTS

Les égouts sont la contre-partie des distributions d'eau. Si l'hygiène publique et privée exige qu'une eau pure et limpide soit mise à la portée de tous et vienne à chaque instant dissoudre ou diluer les germes d'infection, elle veut aussi que tous les produits impurs soient rapidement entraînés loin des villes.

Les distributions d'eau et les égouts constituent le systéme complet de circulation dont le fonctionnement ininterrompu est nécessaire à la santé des villes, comme la circulation du sang est nécessaire à la vie des animaux.

Rôle des égouts. — Les égouts, disent les Anglais, doivent servir à évacuer tout ce qui est susceptible d'être entraîné par les eaux.

L'application absolue de ce principe n'est encore réalisée qu'en quelques pays ; en France, les fosses d'aisances subsistent presque partout, et les matières fécales sont enlevées par les procédés primitifs que tout le monde connaît et qui sont appelés à disparaître dans l'avenir.

Les égouts ont encore un rôle secondaire, susceptible de prendre dans les grandes villes une importante extension : ce sont des voies de communication souterraines. A ce titre, elles reçoivent les conduites d'eau et elles arriveront sans doute à recevoir les conduites de gaz; elles devraient servir en outre, comme M. Haussmann en avait le projet, au transport par wagons de toutes les immondices que viennent aujourd'hui ramasser dans nos rues de lourds tombereaux, encombrants et malpropres.

Évacuation totale par les égouts. — Dans la plupart des villes les égouts ne reçoivent que les eaux pluviales et les eaux qui ont servi à l'arrosage de la voie publique.

Les bouches d'arrosage sont placées en tous les sommets, et chacune d'elles fournit l'eau aux caniveaux de droite et de gauche ; ces caniveaux recueillent aussi l'égout des maisons qui descend par des gouttières et des gargouilles sous trottoirs.

A tous les points bas des caniveaux on trouve une bouche en pierre ou en fonte, ou bien encore une grille ; les eaux s'y engouffrent et, par un branchement, se rendent à l'égout.

Les égouts secondaires, tracés sur les versants des ondulations du sol, aboutissent aux thalwegs de ces ondulations et portent leur tribut à des égouts plus considérables ; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive au grand égout collecteur qui reçoit toutes les déjections de la ville et les emporte au loin.

En Angleterre, avons-nous dit, le principe est que les égouts recueillent non-seulement les eaux pluviales et les eaux d'arrosage, mais encore les eaux ménagères et les matières fécales.

Les eaux ménagères et les eaux industrielles ne sont vraiment dangereuses que lorsqu'elles sont acides ou ammoniacales ; lorsqu'elles sont acides, elles déterminent quelquefois de vives réactions et peuvent attaquer les maçonneries ; lorsqu'elles sont ammoniacales, elles infectent les égouts et empêchent les ouvriers d'y séjourner. — Ces deux espèces d'eaux doivent donc faire l'objet d'un traitement spécial avant d'être envoyées à l'égout.

Les matières fécales sont inoffensives lorsqu'elles sont diluées dans une quantité suffisante d'eau et ne séjournent pas dans les conduits souterrains.

En ce qui touche les eaux ménagères, on ne fait plus difficulté en France de les admettre à l'égout ; un décret de 1852, qui n'a pas été rigoureusement exécuté, ordonnait même que, dans un délai de dix ans, les eaux pluviales et ménagères de toutes les maisons de Paris seraient envoyées à l'égout.

En ce qui touche les matières fécales, les objections subsistent : on craint l'infection des égouts ; on redoute de ne plus trouver d'égouttiers, et on ne veut pas perdre un engrais précieux pour l'agriculture.

Les matières fécales, diluées dans une masse d'eau, perdent leur aspect repoussant et ne dégagent d'odeur sensible que si les eaux restent stagnantes pendant un jour ou deux ; les deux premières objections ne sont donc pas fondées, et la troisième ne l'est plus depuis le succès de l'utilisation des eaux d'égout en agriculture.

Pente à donner aux égouts. — La pente minima à donner aux égouts doit être telle, que l'eau maintienne en suspension les substances diluées et ne les abandonne point en formant des dépôts qui nécessiteraient de fréquents et dispendieux curages.

Cette pente doit encore être suffisante pour imprimer au courant une vitesse telle, que le séjour des eaux corrompues dans les galeries ne dépasse pas une journée ; si ce terme est dépassé, les émanations putrides ne tardent pas à se développer.

La pente dépend en outre du volume de liquide qu'il s'agit de débiter, et, sous ce rapport, elle est liée à la section. — L'égout doit débiter non-seulement le produit constant de l'arrosage et des eaux vannes, mais encore le produit des pluies d'orage qui, en fort peu de temps, fournissent un cube considérable. — Si l'on dispose d'une forte pente, on réduira la section et inversement.

Les enquêtes anglaises ont montré qu'avec une pente de 0,0002, c'est-à-dire de $0^m,20$ par kilomètre, le courant prenait une vitesse de $0^m,65$ par seconde et conservait en suspension toutes les matières diluées. — La distance parcourue par le courant atteignait 57 kilomètres en vingt-quatre heures.

La pente de 20 centimètres par kilomètre est donc un minimum qu'il ne faut point dépasser.

Conditions de construction. — Les égouts doivent être imperméables ; les infiltrations qui s'échappent des anciens égouts mal construits imprégnent le sol avoisinant, quelquefois même se répandent dans les caves ; elles sont des plus dangereuses pour la salubrité publique.

La maçonnerie des égouts doit être peu altérable aux acides : la meulière et les matériaux siliceux seront donc bien préférables aux matériaux calcaires.

Les parois intérieures doivent être dures pour ne pas être détériorées par les

corps flottants; il faut qu'elles soient lisses pour ne point faire obstacle à l'écoulement des eaux.

Le profil intérieur ne doit présenter aucun angle rentrant; tous les raccords doivent se faire par des courbes à grand rayon. De la sorte, la section ne présente aucun espace nuisible dans lequel l'eau reste stagnante, et les émanations ne sont pas à craindre.

La forme circulaire est celle qui donne la moindre résistance à l'écoulement; en principe, c'est donc elle qu'il faut préférer. Mais elle ne permettrait point de circuler facilement dans les petits égouts, et elle se transforme alors en une courbe ovoïde ou ellipse à grand axe vertical; dans les grands égouts, l'installation intérieure et la circulation n'y seraient point très-commodes, et la section circulaire occuperait trop de hauteur: elle se transforme alors en une courbe aplatie, ellipse à grand axe horizontal.

Moyens de combattre les exhalaisons. —Lorsqu'on passe devant une bouche d'égout, on reconnaît qu'il s'en échappe, dans certaines villes, une odeur putride, désagréable et nuisible.—Cette odeur ne se développe que dans les égouts mal disposés qui ne reçoivent point un afflux d'eau assez considérable.

Dans les égouts modernes, les matières convenablement diluées et ne séjournant guère ne répandent pas d'odeurs; les bouches d'égout doivent rester ouvertes, ainsi que toutes les portes, afin de déterminer des courants d'air intérieurs qui assainissent l'égout et en rendent le séjour inoffensif; ces courants sont encore activés par le mouvement de l'eau. Tous ceux qui ont visité les égouts de Paris ont reconnu que l'odeur y était parfaitement tolérable et que les courants d'air devenaient même quelquefois gênants.

Cependant, lorsque les bouches d'égout dégagent des miasmes, il faut s'opposer à ce dégagement. A cet effet, les bouches sont fermées par des trappes mobiles, ou bien ne communiquent avec l'égout qu'au moyen de siphons ou de fermetures hydrauliques analogues aux appareils que nous décrirons tout à l'heure. —Alors l'égout ne se trouve plus ventilé; il ne faut y pénétrer que lorsqu'il a été soumis à des chasses d'eau assez violentes pour en rendre le séjour inoffensif.

Même avec les anciens égouts, si l'on a soin de faire suivre les bouches de branchements assez longs, on arrive à atténuer notablement les dégagements d'odeur sur la voie publique.

Il n'en est pas de même pour les conduits qui amènent à l'égout les eaux ménagères et les matières fécales; ces conduits débouchent soit dans les éviers des cuisines, soit dans les water-closets; ils dégagent une odeur infecte lorsqu'ils communiquent librement avec l'égout.

Autrefois l'orifice inférieur de ces conduits était fermé par une soupape à bascule et à contre-poids; lorsque la pression du liquide accumulé venait à l'emporter sur le contre-poids, la soupape basculait et l'émission s'opérait ainsi d'une manière intermittente. Seulement, la fermeture n'était jamais hermétique et on n'évitait point les bouffées méphitiques.

La fermeture hydraulique, figure 48, est bien préférable; les eaux vannes tombent dans le réservoir *a* qui communique avec le réservoir *b*, dont il est séparé par une cloison verticale pendante qui descend jusqu'au-dessous du niveau du conduit d'évacuation, qui se rend à l'égout; l'eau ne s'abaisse donc jamais dans le réservoir *a* au-dessous de la cloison verticale, et la communication directe entre le conduit de la maison et l'égout ne s'établit jamais.

On obtient le même résultat avec le siphon renversé de la figure 49; mais les résidus solides peuvent s'accumuler dans le coude et obstruer le passage; il

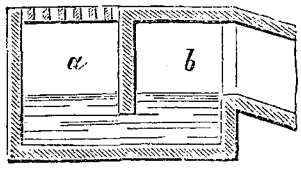

Fig. 48.

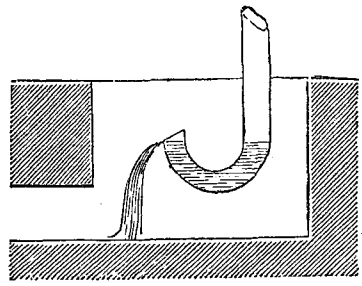
Fig. 49.

faut alors recourir à une chasse d'eau assez violente. Mieux vaut éviter cette sujétion et employer la fermeture hydraulique à deux compartiments.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES ÉGOUTS DE PARIS

Nous n'entrerons point dans les détails de construction des égouts; ces détails se trouvent dans d'autres parties de notre ouvrage. Les égouts s'exécutent quelquefois en souterrain, mais, le plus souvent, à ciel ouvert dans des fouilles étrésillonnées; nous avons donné de nombreux exemples de ce genre de travaux.

Nous nous bornerons ici à une description sommaire des égouts de Paris, dont les types sont partout applicables.

C'est en 1854 que fut projeté le réseau complet des égouts de Paris, qui se termine par deux grands collecteurs débouchant en Seine, à 20 kilomètres à l'aval de Paris, en suivant le cours du fleuve.

Le collecteur de la rive droite a 4,600 mètres de long; sa largeur est de $5^m,60$ aux naissances, sa hauteur sous clef $4^m,40$; il présente une cuvette centrale de $3^m,50$ de large et de $1^m,35$ de profondeur, flanquée de deux banquettes. Il forme comme le prolongement du collecteur des quais de la rive droite et reçoit le produit des collecteurs secondaires, tels que le collecteur des coteaux et le collecteur de la rue de Rivoli.

Le collecteur de la rive gauche part de la Bièvre et suit les quais jusqu'au pont de l'Alma : là, il traverse la Seine en siphon par deux tuyaux en tôle immergés d'un mètre de diamètre chacun.

De là il se dirige vers Asnières où il dégorge en Seine au même point que le collecteur de la rive droite.

A l'autre extrémité de l'échelle, on trouve le petit égout de branchement, dont la hauteur est de $2^m,30$ sous clef et la largeur de $1^m,30$ aux naissances; ce dernier type permet encore la libre circulation des ouvriers; il peut facilement être visité et nettoyé.

Entre le grand collecteur et le branchement, on trouve dix types; les uns ont une seule banquette, les autres en ont deux et les arêtes de ces banquettes sont garnies de cornières, servant de rails aux wagonnets de service et aux wagons-vannes, chargés d'opérer un curage continu, wagons que nous avons décrits à l'article « Draguages » dans le *Traité de l'exécution des travaux*.

La maçonnerie des égouts est en meulière et mortier de chaux hydraulique ou de ciment ; le mortier de ciment est avantageux, par sa solidité et sa prise rapide. La section intérieure des égouts est revêtue d'un enduit lisse en mortier de ciment, qui donne d'excellents resultats.

Les figures 1 à 5 de la planche 15 représentent divers types des égouts de Paris.

La figure 4 donne la coupe en travers du grand collecteur, qui conduit à Asnières les eaux de la rive droite et celles de la rive gauche. C'est le plus grand ouvrage de ce genre ; ses dimensions sont supérieures à celles de la fameuse Cloaca maxima de Rome. Le curage de ce collecteur s'effectue au moyen d'un bateau-vanne semblable au wagon-vanne, que nous avons décrit ; à l'avant de ce bateau est une vanne, à charnière horizontale, ayant la forme générale de la cuvette ; elle retient les eaux d'amont, et ces eaux s'échappent avec violence entre les bords de la vanne et les parois de la cuvette, elles entraînent les dépôts et dégagent le chenal, de sorte que le bateau descend lentement en effectuant un curage automatique. Pour le ramener à son point de départ, on relève la vanne et on le tire à bras d'hommes.

La figure 2 représente la coupe en travers de l'égout du boulevard de Sébastopol, qui reçoit deux conduites d'eau : l'une de $1^m,10$, l'autre de $0^m,80$ de diamètre. Il conduit à la Seine les eaux des pluies d'orage de la moitié des quartiers de la rive droite.

La figure 5 représente le grand égout de la rue de Rivoli, qui débouche dans le collecteur d'Asnières.

La figure 1 représente le petit égout de branchement et la figure 3 l'égout du boulevard Saint-Germain, qui débouche dans le collecteur de la rive gauche.

Sur la figure 6, on voit le type n° 4 de la ville de Lyon ; les branchements particuliers se composent à Lyon de tuyaux cylindriques en poterie.

Le prix du petit égout de branchement est de 100 francs le mètre courant.

ÉPURATION DES EAUX D'ÉGOUT

Les collecteurs des grandes villes roulent des eaux chargées de matières putrescibles qui ne tardent pas à se corrompre ; pour assainir les villes, on est conduit à infecter les campagnes suburbaines. Il est donc nécessaire de purifier les eaux d'égout et de leur enlever toutes les matières organiques, dont elles sont chargées.

Ce problème, étudié depuis plusieurs années, semble avoir trouvé une solution heureuse dans l'emploi agricole des eaux d'égout.

On trouve des renseignements sur la question dans les ouvrages ci-après :

1° Note sur l'épuration des eaux d'égout de Reims, *Annales des Ponts et Chaussées*, février 1869 ;

2° Épuration des eaux d'égout, par MM. Mille et Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, novembre 1869 ;

3° Note insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées*, de février 1872 ;

4° Étude de M. l'ingénieur Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, février 1873 ;

5° Étude sur les eaux d'égout de Reims, par M. Gariel, *Annales des Ponts et Chaussées*, juillet 1873.

6° Situation de la question des eaux d'égout, par M. Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, mars 1874;

7° Principes de l'assainissement des villes, par M. de Freycinet, 1 volume avec atlas.

Un décret du 22 août 1874 a institué une Commission, chargée de proposer les mesures à prendre pour remédier à l'infection de la Seine, aux abords de Paris.

Le remarquable rapport de cette Commission a été inséré au *Journal officiel* du 10 avril 1875; il élucide complétement la question. Aussi croyons-nous utile de le reproduire ici.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

RAPPORT DE LA COMMISSION CHARGÉE DE PROPOSER LES MESURES A PRENDRE POUR RÉMÉDIER A L'INFECTION DE LA SEINE AUX ENVIRONS DE PARIS

INTRODUCTION

Nomination de la Commission

Par décret en date du 22 août 1874, M. le ministre des travaux publics a institué une commission spéciale « chargée de proposer les mesures à prendre pour remédier à l'infection des eaux de la Seine aux abords de Paris. »

Sa composition

Dans cette commission étaient représentés à la fois le département des travaux publics, les services placés dans les attributions de M. le préfet de la Seine, et les services placés dans les attributions de M. le préfet de police [1].

[1] La commission était composée de :

Pour représenter le département des travaux publics.

MM. Kleitz, inspecteur général des ponts et chaussées, président.
Chatoney, inspecteur général des ponts et chaussées.
Krantz, ingénieur en chef, chargé du service de la 3e section de la Seine.

Pour représenter les services placés dans les attributions de M. le Préfet de la Seine.

MM. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des eaux et égouts de Paris.
Alphand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des travaux de Paris.
Mille, inspecteur général des ponts et chaussées.
Vaudrey, ingénieur en chef, chargé du service de la 2e section de la Seine.
Callon, conseiller municipal de Paris.
Dr Depaul, conseiller municipal de Paris.

Pour représenter les services placés dans les attributions de M. le Préfet de Police.

M. Chevalier, membre du conseil de salubrité.
Boudet, membre du conseil de salubrité.

La commission s'est adjoint comme secrétaire et a ensuite désigné comme rapporteur M. Durand-Claye, ingénieur des ponts et chaussées.

Objet du Rapport

La commission vient aujourd'hui rendre compte de la mission qui lui a été confiée.

Historique sommaire

L'administration des travaux publics s'est déjà préoccupée plus d'une fois de la corruption des eaux de la Seine aux abords de Paris. En vertu d'une décision ministérielle du 23 octobre 1869, des conférences ont eu lieu entre les ingénieurs de la navigation et ceux du service municipal de la ville de Paris. Ces derniers produisirent en outre, en 1870, un avant-projet général pour l'utilisation et l'épuration des eaux des égouts. Les conclusions des ingénieurs réunis en conférence, ainsi que les dispositions prévues à l'avant-projet, firent l'objet de deux rapports détaillés de la part de M. l'inspecteur général Kleitz, en date des 2 mars et 15 juillet 1870. Le conseil général des ponts et chaussées discuta les deux rapports dans sa séance du 21 juillet 1870. Par une dépêche du 30 juillet de la même année, M. le ministre des travaux publics transmit, avec son approbation, l'avis du conseil général des ponts et chaussées à M. le préfet de la Seine. De cet avis il résultait :

1° Que la ville de Paris était tenue de remédier aux inconvénients que créait en Seine l'écoulement des eaux des collecteurs de Clichy et de Saint-Denis;

2° Que, dans ce but, la ville de Paris devait, d'une part, assurer un service satisfaisant des draguages; de l'autre, continuer, en les développant, les expériences entreprises à Gennevilliers en vue de la désinfection des eaux d'égout par leur application à l'irrigation et par l'épuration au sulfate d'alumine; l'avant-projet, dressé en 1870 par les ingénieurs du service municipal, était signalé à M. le préfet de la Seine comme pouvant remplir ce dernier but.

Quelques jours après la décision ministérielle précitée, les événements de la guerre venaient apporter un trouble profond dans la banlieue de Paris. Après la lutte contre l'étranger et contre l'insurrection, l'administration municipale de la ville de Paris fut réorganisée sur de nouvelles bases; les essais d'utilisation et d'épuration des eaux d'égout furent repris et considérablement développés; d'autre part, les inconvénients résultant du déversement des eaux d'égout en Seine allèrent chaque année en s'accusant davantage.

La commission s'est donc trouvée en présence de faits plus nombreux et plus nettement caractérisés qu'en 1870; elle a cherché, dans plusieurs séances et tournées sur le terrain, à remplir de son mieux la tâche qui lui incombait et à répondre aux intentions de M. le ministre des travaux publics en examinant la question sous toutes ses faces, suivant la recommandation expresse de M. le ministre (lettre du 21 juillet 1874 à M. le préfet de la Seine).

Division du Rapport

Le travail de la commission se divisait naturellement en deux parties distinctes :

1° Constatation de l'infection de la Seine aux abords de Paris et recherche des causes de cette infection;

2° Examen et choix des mesures à prendre pour remédier à cette infection.

Ce sont les deux grandes divisions de ce rapport.

PREMIÈRE PARTIE

CONSTATATION DE L'INFECTION DE LA SEINE AUX ABORDS DE PARIS. CAUSE DE CETTE INFECTION

Phénomènes qui caractérisent l'infection de la Seine

Les phénomènes qui caractérisent l'infection de la Seine sont de deux ordres : les uns, extérieurs, de l'ordre physique ou physiologique, frappent facilement l'attention de toute personne qui suit les bords du fleuve; les autres, plus scientifiques, exigent le concours de la chimie pour acquérir toute leur valeur; ils définissent d'une manière précise les faits de corruption et permettent d'en suivre le développement et la propagation.

Caractères extérieurs de l'infection de la Seine

Pour apprécier les caractères extérieurs de l'infection de la Seine, la commission a parcouru, le 11 octobre, la partie du fleuve la plus gravement atteinte, c'est-à-dire celle qui s'étend entre Clichy et Rueil : plusieurs de ses membres ont complété cette tournée en communiquant les observations qu'ils avaient pu noter dans les parties du fleuve situées en amont ou en aval de la section précitée. De ces diverses constatations résultent les faits suivants :

En amont de Paris, dans la traversée de la capitale ainsi qu'entre les fortifications et Asnières, la Seine présente un aspect satisfaisant, au moins à la simple inspection superficielle. Le progrès accompli par la grande œuvre de la canalisation de Paris et des collecteurs se manifeste d'une manière évidente. En un certain nombre de points, répartis sur les deux rives, des filets d'eaux impures sortent de divers établissements industriels ou des égouts de la banlieue et même des égouts de Paris non encore réunis aux collecteurs, mais ces filets sont rapidement noyés dans la masse du fleuve. Les poissons vivent dans toute la largeur de la rivière; des végétaux d'ordre élevé poussent sur les berges; le fond de la Seine est formé de sables blancs. Pendant les chaleurs et les sécheresses de la saison dernière, tout le monde a pu constater l'état relativement satisfaisant de la Seine dans tout ce parcours.

En aval du pont d'Asnières la situation change brusquement. Sur la rive droite de la Seine se trouve le débouché du grand collecteur de Clichy. Un courant considérable d'eau noirâtre sort de ce collecteur et s'épanouit en Seine en formant une courbe parabolique. Cette courbe occupe une étendue variable dans le courant : en temps ordinaire, elle tient environ la moitié de la largeur du fleuve; en temps de pluie d'orage, elle se rapproche de la rive gauche. Cette eau est d'un aspect répugnant; elle est chargée de débris organiques de toute sorte : légumes, bouchons, poils, cheveux, cadavres d'animaux domestiques, etc... Elle est ordinairement recouverte d'une couche de matière graisseuse qui, suivant la direction du vent, vient s'accumuler sur une rive ou sur l'autre. Une vase grise, mélangée de débris organiques, s'accumule le long de la rive droite et forme des bancs d'atterrissements qui, à certaines périodes de l'année, présentent des saillies considérables hors de l'eau et ne disparaissent que grâce à de coûteux draguages. Cette vase descend jusqu'au thalweg du fleuve; elle est le siége d'une fermentation active qui se traduit par des bulles innombrables de gaz venant crever à la surface de l'eau; pendant une grande partie de l'année, et principalement au moment des fortes chaleurs, ces bulles atteignent des dimensions considérables (1 mètre à $1^{m},50$ de diamètre). Elles entraînent la vase en s'en dégageant et amènent à la surface des matières noires et infectes qui cheminent ensuite à découvert avec le courant. Le passage d'un bateau soulève des flots d'écume et crée une véritable ébullition qui dure quelques minutes dans le sillage.

Tous ces phénomènes se produisaient en 1870 sur la seule rive droite du fleuve, et l'infection ne se manifestait d'une manière évidente que sur le premier des trois bras que la Seine forme à Clichy, entre les rives et les îles Vaillard et Robinson. Aujourd'hui le second bras est complétement envahi et l'altération se montre sur la rive droite du dernier bras. Aucun être vivant, aucun poisson, aucune herbe verte ne se rencontre dans le bras droit ; dans le bras central, le poisson commence à apparaître et se retrouve dans le bras gauche. Les jours de grande pluie d'orage, lorsque le courant des eaux d'égout envahit la totalité de la largeur de la Seine, les poissons peuvent être accidentellement détruits, même dans les parages qu'ils fréquentent habituellement, par suite de l'infection générale et temporaire du fleuve. Le bras central présente une végétation moyenne; les herbes sont extrêmement fortes et vivaces sur le bras gauche. Au delà des îles de Clichy et jusqu'à l'île Saint-Denis, l'altération continue en s'accusant un peu moins fortement à la surface; l'eau conserve une couleur noirâtre; la rive droite est toujours bordée d'écumes et de graisses; l'altération semble s'étendre sur la largeur complète de la rivière; la berge gauche est garnie de débris végétaux, de bouchons, etc., et d'une couche mince de vase grisâtre.

A Saint-Ouen commence l'île Saint-Denis, qui s'étend jusqu'à 2 kilomètres d'Argenteuil et sépare le fleuve en deux bras distincts : le bras gauche, alimenté par la partie la moins altérée du fleuve et ne recevant du reste aucun nouvel affluent d'eau infecte, présente des eaux qui semblent d'une pureté très-suffisante. Le bras droit, au contraire, alimenté par le courant même du collecteur de Clichy, qui a suivi spécialement la rive droite du fleuve, conserve devant Saint-Ouen et au delà les caractères d'infection constatés à Clichy; ceux-ci vont cependant en diminuant d'intensité apparente jusqu'au pont suspendu de Saint-Denis; c'est ainsi que la vase, dont la répartition sur le fond du fleuve a été faite, à la demande de la commission, par les ingénieurs de la navigation de la Seine, atteint à Clichy des épaisseurs de 2 à 3 mètres, et n'a plus que 65 centimètres d'épaisseur à Saint-Ouen. Aux premières maisons de Saint-Denis, des usines commencent à amener une recrudescence d'infection par un assez grand nombre de déjections industrielles. Mais leur action est peu de chose à côté de celle du collecteur départemental qui débouche à quelques mètres en aval du pont suspendu. Cet égout vomit une eau absolument noire et fétide, dont l'odeur ammoniacale est des plus prononcées. Cette eau envahit bientôt la largeur complète du bras. Des écumes flottent sur toute la surface; des bulles de gaz se dégagent de tous côtés. Cet état se continue, avec une intensité à peu près constante, jusqu'en face le village d'Épinay. Le fond du fleuve est, dans tout ce parcours, garni d'une vase noire, fétide, gluante, peuplée de vers rougeâtres qui ne se trouvent que dans les eaux de vidange les plus infectes. Périodiquement cette vase émerge au voisinage de la bouche du collecteur et doit être extraite par draguage. — Notons que la rivière du Croult, qui débouche en Seine, entre Saint-Denis et Épinay, vient ajouter un assez notable contingent d'eaux industrielles à l'afflux infect du collecteur. D'Épinay à Argenteuil, une amélioration apparente se manifeste, spécialement après la réunion des deux bras, à l'extrémité de l'île Saint-Denis. L'eau, encore foncée de couleur, n'offre plus que de rares débris flottants; la vase a à peu près disparu : le poisson réapparaît en temps normal. D'Argenteuil au barrage de Bezons, la Seine présente un aspect acceptable. Mais au niveau du barrage, dans le bras gauche formé par l'île du Chiard et ses annexes, une odeur très-marquée se fait de nouveau sentir; les eaux impures semblent rejetées par le barrage sur la rive gauche. La vase noirâtre réapparaît sur toute la largeur du bras avec une épaisseur de 70 centimètres environ. Bientôt l'odeur disparaît; une végétation des plus abondantes garnit les deux rives et encombre même en partie le cours du fleuve par de larges plaques de lentilles d'eau. A Marly, les bajoyers de l'écluse sont couverts d'un dépôt noir et fétide, des écumes se voient le long du barrage et des appareils annexes. L'eau conserve toujours une teinte foncée qu'elle manifeste également dans le bras droit qui passe devant Chatou. Au delà de Marly, les deux bras se réunissent de nouveau. L'intensité de coloration du fleuve diminue graduellement. L'eau est encore trouble et d'un goût peu agréable à Saint-Germain et à Maisons-Laffite. Au delà, vers la Frette et Conflans, et spécialement après le confluent de l'Oise, la Seine a repris en appa-

rence un état sensiblement analogue à celui qu'elle offrait en amont des collecteurs. A Meulan, toute trace extérieure d'infection a disparu.

Caractères chimiques de l'infection de la Seine. Azote et oxygène

Cette simple description de l'aspect que présente actuellement la Seine aux abords de Paris suffit sans doute pour indiquer la gravité de la situation. Mais la commission a cru devoir ajouter à la constatation des faits extérieurs quelques traits empruntés à des recherches plus scientifiques. Elle a donc puisé les renseignements qui vont suivre à des sources autorisées, parmi lesquelles elle doit citer les analyses dues au laboratoire de l'École des ponts et chaussées, et les recherches sur les gaz dissous faites par MM. Boudet, membre du conseil de salubrité, et Gérardin, inspecteur des établissements insalubres de l'arrondissement de Saint-Denis, d'après la méthode dont le principe est dû à M. Schutzenberger, directeur du laboratoire de la Sorbonne[1].

Au point de vue chimique, les eaux impures qui se déversent en Seine produisent deux effets distincts : les matières *minérales* toutes formées, qu'elles contiennent à l'état de suspension ou de dissolution, encombrent le lit du fleuve et altèrent sa composition normale par simple mélange ; l'enlèvement mécanique des depôts et la seule dilution par le courant des substances dissoutes suffiraient, à la rigueur, pour faire disparaître cette altération. Mais lorsque les eaux affluentes contiennent des matières *organiques*, animales ou végétales, lorsqu'en même temps la vitesse de circulation est peu considérable, comme en Seine, le fleuve devient lui-même le siége de décompositions multiples qui altèrent profondément ses eaux et leur donnent sur un long parcours un caractère d'infection spéciale qui ne saurait être négligé au point de vue de la salubrité publique. Les matières organiques se transforment en effet dans le fleuve même, en acide carbonique, eau, carbures d'hydrogène, ammoniaque, acide sulfhydrique et substances minérales diverses. Cette transformation implique toujours une absorption d'oxygène emprunté au gaz dissous dans l'eau, et une production de corps minéraux azotés. Tant que les matières organiques azotées sont abondantes, l'eau est absolument viciée, susceptible de fermentation, impropre à un usage quelconque, fût-ce même à l'arrosage des voies publiques. Lorsque la fermentation est achevée, lorsque les matières organiques sont toutes passées à l'état de matières minérales, inoffensives en elles-mêmes, les eaux présentent à la fois une diminution dans l'oxygène dissous et une disparition des matières organiques azotées, remplacées par des matières minérales azotées, par l'ammoniaque. Les eaux deviennent alors propres à la plupart des usages courants; elles peuvent rester quelque temps pauvres en oxygène; mais l'absence d'oxygène est une conséquence et non un caractère parallèle à la fermentation; une simple action mécanique, telle que le mouvement dû au courant ou aux chutes des barrages, peut ramener progressivement les eaux à leur état normal et les rendre enfin réellement potables.

Pour apprécier l'état d'infection du fleuve, la commission a donc cherché la quantité de matières azotées organiques non encore transformées en ammoniaque que les eaux pouvaient renfermer en divers points; cette dose spécifiait la pollution vraie du fleuve, en

[1] Au mois de juin 1874 le conseil de salubrité, saisi par M. le préfet de Police de plaintes très vives de la part des riverains de la Seine, au sujet de l'altération de ses eaux par les égouts collecteurs de Paris, avait chargé M. Boudet, l'un des membres de la commission, d'apprécier la valeur de ces plaintes et les altérations de la Seine produites par les égouts.

Le conseil de salubrité, dans sa séance du 23 octobre, après avoir entendu le rapport de M. Boudet, a émis le vœu qu'en présence des faits constatés dans le rapport, M. le Préfet de Police voulût bien insister auprès de l'administration municipale pour que les études, les recherches et les travaux destinés à résoudre l'important problème de l'assainissement de la Seine soient poursuivis avec la plus grande activité.

Ce rapport, qui a été lu à la commission au cours de ses délibérations, contient le détail des dosages de l'oxygène en dissolution dans les eaux de la Seine, dans un grand nombre de stations choisies en amont de Paris jusqu'à Corbeil, dans l'enceinte même de la capitale, et en aval jusqu'à Rouen.

C'est au tableau de ces analyses oxymétriques exécutées par MM. Boudet et Gérardin que nous avons emprunté tous les titrages d'oxygène que nous avons consignés dans notre travail.

précisant les matières susceptibles d'entrer encore en fermentation. Les dosages d'oxygène formaient le complément de ces premières recherches ; ils fixaient l'intensité de la fermentation déjà produite, ils mesuraient le résultat final des réactions accomplies; les deux procédés se complétaient et s'éclairaient l'un l'autre.

Le tableau suivant résume les dosages effectués :

INDICATION DES PRISES D'ÉCHANTILLONS D'EAU DE SEINE	AZOTE non encore transformé en sels ammoniacaux volatils ou azote organique exprimé en grammes par mètre cube ou 1,000 lit. d'eau. (Analyse de 1874).	AZOTE total y compris les sels ammoniacaux volatils exprimés en grammes par mètre cube. (Analyses de 1869 et 1874.)	OXYGÈNE dissous exprimé en centimètres cubes par litre d'eau.	OBSERVATIONS
	grammes	grammes	cent. cubes	
Pont d'Anières, amont du collecteur.	0,85	1,5	5,34	Le bras gauche, formé par l'île Saint-Denis, présente, à la hauteur d'Epinay, les doses suivantes : Azote. { organique 0,55 ; total. . . . 1,50 } Oxygène. . . . 5cc00
Débouché du collecteur de Clichy.	»	29,5	»	
Clichy, aval du collecteur. { Bras droit. . . .	1,51	4,0	4,60	
Bras central. . .	1,28	»		
Bras gauche. . .	1,25	»		
Saint-Ouen, bras droit.	1,16	2,0	4,07	
Saint-Denis, bras droit, amont du collecteur.	»	2,0	2,65	
Débouché du collecteur départemental.	»	98,0	»	
Saint-Denis, bras droit, aval du collecteur et du Croult. . . .	7,27	7,0	1,02	
Épinay, bras droit.	1,26	3,0	1,05	
Bezons, toute la largeur du courant.	0,87	0,9	1,54	
Marly, bras gauche, amont du barrage.	0,78	3,5	1,91	
Marly, aval du barrage.	0,81	»	»	
Saint-Germain.	0,76	2,2	»	
Maisons-Laffite.	0,79	2,5	3,74	
Conflans.	0,46	»	»	
Poissy.	0,45	2,2	6,12	
Triel.	0,50	»	7,07	
Meulan.	0,40	»	8,17	
Mantes.	»	1,4	8,96	
Vernon.	»	»	10,40	
Rouen.	»	»	10,42	

D'après les chiffres contenus dans ce tableau, on voit la quantité d'azote organique, qui atteint seulement $0^{gr},85$ par mètre cube avant le collecteur de Clichy, passer à $1^{gr},50$ sur la moitié droite du courant, après l'addition des eaux de ce collecteur, et atteindre $7^{gr},27$ après l'addition des eaux du collecteur départemental. L'azote total passe de $1^{gr},5$ au pont d'Asnières, à 4 grammes après le collecteur de Clichy, puis atteint 2 grammes, puis enfin 7 grammes après le collecteur départemental. Sur la partie gauche, l'altération est sensible à Clichy, où la quantité d'azote organique est de $1^{gr},25$. Au delà de Saint-Ouen, l'amélioration se manifeste de ce côté, et, en face de Saint-Denis, le bras gauche ne dose plus que $0^{gr},35$. Revenant au bras droit, nous le trouvons encore infect à Épinay, $1^{gr},26$ d'azote organique et 3 grammes d'azote total. A Bezons, le titre en azote organique est redevenu sur toute la largeur du courant ce qu'il était au pont d'Asnières; il se maintient dans les mêmes limites jusqu'à Marly. L'azote total, après une baisse passagère à Bezons, reste à une dose élevée, $3^{gr},5$, jusqu'à Marly; cette dose, rapprochée du titre assez bas en azote organique, indique que dans ces parages la transformation des matières organiques en matières minérales est à peu près achevée. Au delà de Marly et

jusqu'à Meulan, le titre en azote organique va en baissant constamment; à Meulan, il n'est plus que la moitié de ce qu'il était, même en amont du collecteur. L'eau est donc en ce point d'une pureté chimique très-satisfaisante. Les causes organiques de fermentation ont presque totalement disparu. Quant à l'oxygène qui suit la fermentation, comme la précède l'azote non décomposé, il part de 5cc,34 au pont d'Asnières, varie entre 4cc,6 à Clichy (moyenne des trois bras) et 2cc,6 vers Saint-Denis (bras droit), présente son minimum en aval de Saint-Denis, où la dose n'est plus guère que de 1 centimètre cube. Il conserve un titre très-bas jusqu'à Marly, où il n'est encore qu'à la dose de 1cc,91. Il se relève ensuite lentement, retrouve entre Maisons-Laffite et Conflans sa valeur du pont d'Asnières, et revient enfin à un titre élevé de 8 à 9 centimètres cubes de Meulan à Mantes. Quant au bras gauche, formé par l'île Saint-Denis entre Saint-Ouen et Argenteuil, l'oxygène, comme l'azote, indique une amélioration sensible en face Saint-Ouen, où l'oxygène est coté 5 centimètres cubes.

De ces chiffres résulte donc que l'eau est profondément altérée par les matières organiques fermentescibles dans toute sa largeur de Clichy à Saint-Ouen, tout le long de l'île Saint-Denis sur le bras droit entier, et retrouve, à ce point de vue, le même état qu'à Asnières, entre Bezons et Marly; que, dans ce dernier parcours, elle est encore chargée de matières azotées minérales; qu'en outre, cette eau, dépouillée progressivement de son oxygène jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, conserve une aération absolument insuffisante jusqu'à Marly et au delà, reprend le titre d'Asnières seulement au delà de Maisons-Laffite et n'arrive à une bonne qualité que vers Meulan. En ce point, l'eau se trouve régénérée à la fois par la transformation de ses matières organiques azotées en matières minérales et par la récupération de l'oxygène qu'elle avait perdu par la fermentation.

Les données scientifiques viennent ainsi confirmer les faits qui résultent d'une simple observation superficielle. En somme, entre Clichy et l'extrémité de l'île Saint-Denis, en amont d'Argenteuil, l'eau de la Seine, dans le bras qui reçoit les collecteurs, est absolument impropre à un usage domestique quelconque; elle renferme des éléments fermentescibles prêts à entrer en décomposition et à répandre l'infection; l'oxygène dissous a presque totalement disparu. Entre Argenteuil et Marly, sur le bras gauche, l'eau devient moins impure et, au point de vue chimique, elle est susceptible de se prêter à une grande partie des usages courants auxquels peuvent la consacrer les riverains; sans être impropre à l'alimentation, elle a encore une aération insuffisante et est chargée d'une assez forte proportion de substances minérales azotées. Au delà de Marly, l'amélioration est progressive; l'eau est de qualité acceptable à tous les points de vue vers Conflans et de bonne qualité à Meulan.

La commission n'a pas cru devoir clore l'examen scientifique de l'altération de la Seine en aval des collecteurs sans fixer un instant son attention sur les gaz, produit de la fermentation, dont elle avait remarqué l'abondant dégagement depuis Clichy jusqu'à l'extrémité de l'île de Saint-Denis, précisément dans l'étendue du fleuve où se produit l'absorption successive de l'oxygène.

Les ingénieurs du service municipal lui ont fourni une analyse de ce gaz, faite à leur laboratoire de Clichy en 1871.

Hydrogène protocarboné.	72,88	p. 100.
Acide carbonique.	12,30	—
Oxyde de carbone.	2,54	—
Acide sulfhydrique.	6,70	—
Divers	4,58	—

Comme on le voit, le gaz est constitué en majeure partie d'hydrogène protocarboné (gaz des marais). Il brûle avec une flamme bleuâtre. Outre les éléments asphyxiants (hydrogène carboné et acide carbonique), il renferme des éléments toxiques (oxyde de carbone et acide sulfhydrique), et effectivement, un animal de petite taille, introduit sous une cloche pleine de gaz, périt instantanément. Un des membres de la commission, en présence de la composition de ces gaz, avait émis des craintes au sujet des

dangers immédiats que pouvait faire courir à la santé publique leur dégagement permanent, mais, après discussion, la majorité de la commission n'a pas cru devoir partager ces craintes : il a été fait observer que les gaz dégagés étaient immédiatement dilués dans une masse d'air considérable ; qu'aucun fait n'était venu révéler l'imminence d'un danger quelconque résultant de ces émanations; que les agents du service des égouts ou des vidanges n'étaient sujets à aucune affection grave spécialement due aux miasmes qu'ils respirent journellement; que, du reste, si les plaintes des riverains de la Seine étaient incessantes et de plus en plus vives au sujet de la qualité des eaux du fleuve, on ne trouvait aucune trace de plaintes relatives à l'altération de l'atmosphère, et qu'au contraire les rives de la Seine à Argenteuil, Bezons, Chatou, Bougival, garnies de maisons de campagne, avaient une réputation d'air pur qu'elles ne sauraient conserver si des affections spéciales les avaient envahies.

La commission a donc été d'avis qu'en l'état actuel des choses rien ne portait à croire que les gaz dégagés de la Seine eussent une action immédiate et directe sur la santé publique. Il va du reste de soi que toute solution applicable à l'assainissement du fleuve entraînera l'enlèvement des eaux infectes du cours même de la Seine et fera ainsi disparaître les éléments de la fermentation et par suite les gaz méphitiques qui en sont la conséquence.

CAUSES DE L'INFECTION DE LA SEINE

1° Causes prédominantes, eaux des collecteurs, leur cube journalier, leur composition

L'étude de l'état du fleuve que vient de présenter la commission montre clairement quelles sont les causes prédominantes de l'infection du fleuve : ces causes sont évidemment l'afflux des eaux d'égout de Paris. Sans insister par conséquent sur des recherches détaillées, faites sur les eaux d'égout dans des rapports spéciaux par les ingénieurs du service municipal de la ville de Paris, la commission terminera la première partie de son travail par la citation de quelques chiffres qui permettront d'apprécier ces eaux prises isolément, avant leur mélange aux eaux du fleuve; ces chiffres seront la preuve, en quelque sorte mathématique, de l'influence que doit forcément exercer l'afflux continuel de matières décomposables dans un courant originairement pur, influence que la commission a effectivement décrite et étudiée dans son examen de l'état du fleuve.

Le réseau des égouts de Paris, qui, en 1856, ne comptait que 160 kilomètres, comprend aujourd'hui 573 kilomètres d'égout public et atteint, avec ses annexes, 771 kilomètres. Ce vaste réseau réunit les eaux de pluie, les eaux ménagères, les eaux vannes des tinettes-filtres et des urinoirs publics, une partie des balayures des rues, etc.

Les deux bouches de Clichy et de Saint-Denis versent en Seine un cube journalier moyen d'environ 260,000 mètres cubes, soit à peu près 3 mètres cubes à la seconde, dont les quatre cinquièmes à Clichy ($2^{mc},500$) et le cinquième à Saint-Denis ($0^{mc},500$) ; c'est, par an, un cube total de 95 millions de mètres cubes d'eaux impures versées en Seine; ce chiffre atteindra prochainement 100 millions après l'achèvement des travaux de la Vanne. Comme il a été exposé ci-dessus, cet afflux de matières étrangères se traduit par des atterrissements solides et par la pollution des eaux. En effet, chaque mètre cube déversé à Clichy contient, en moyenne $1^{k},28$ de matières solides; à Saint-Denis, nous avons $1^{k},54$ de matières solides. Chaque année, le collecteur de Clichy encombre ainsi de 100,000 tonnes de matières solides le lit du fleuve, et le collecteur de Saint-Denis de 25,000 tonnes, soit 125,000 tonnes en tout. Et ces dépôts n'ont pas le seul inconvénient d'encombrer le lit : ils renferment 10 à 25 pour 100 de matières organiques avec $0^{k},4$ à $0^{k},6$ d'azote pour 100. Ils sont donc susceptibles de subir les décompositions ultérieures que manifestent les eaux de la Seine. Ils ne renferment, du reste, qu'une fraction des éléments décomposables apportés par les collecteurs, car à Clichy, l'eau

totale d'égout, outre 1k,28 de matières solides, renferme 0k,82 de matières dissoutes, et l'ensemble, qui représente un poids de 2k,10 par mètre cube, dose :

	0 k. 040 d'azote.
	0 k. 660 de matières volatiles ou combustibles organiques en grande partie.
	1 k. 400 de matières minérales.
TOTAL. . .	2 k. 100

A Saint-Denis, aux 1k,54 de matières solides s'ajoutent 1k,92 de matières organiques dissoutes, soit en tout 3k,46, dosant :

	0 k. 140 d'azote.
	1 k. 380 de matières volatiles ou combustibles.
	1 k. 940 de matières minérales.
TOTAL. . .	3 k. 460

L'influence des matières de vidange se traduit ici par une dose d'azote trois fois et demie plus forte qu'à Clichy et une dose double de matières volatiles et combustibles. On comprend donc la recrudescence d'altération qu'apporte en Seine le collecteur départemental, puisque, tout en ne représentant en volume que le cinquième du collecteur de Clichy, il représente, par son infection spéciale manifestée par son azote, les 0,7 du même collecteur au point de vue de la pollution de la rivière.

Ces quelques chiffres suffisent pour caractériser chimiquement les deux affluents qui viennent infecter la Seine en aval de Paris. Il n'est du reste pas inutile de remarquer que le débit total du fleuve n'étant guère que de 45 mètres en étiage, soit quinze fois seulement le débit du collecteur, et la vitesse en Seine descendant alors à quelques centimètres (0m,13 constatés en étiage, en 1869), par suite du fonctionnement des barrages établis à Suresnes et Bezons, les eaux d'égout de Paris se trouvent déversées dans une sorte de bassin sans vitesse, où elles rencontrent toutes les conditions les plus favorables à leur décomposition.

Il serait injuste de ne pas ajouter qu'avec les conditions nouvelles introduites dans les allures de la Seine par la généralisation des barrages, les effets d'infection constatés aujourd'hui au-dessous de Clichy se produiraient, sans la création des collecteurs, dans la traversée même de Paris et dans la riche banlieue de Sèvres, Saint-Cloud, Neuilly, Courbevoie. Les grands collecteurs assainissent donc les parties les plus populeuses de l'agglomération parisienne; ils concentrent l'infection des eaux d'égout, mais sans l'accroître, et ils offrent même par cette concentration, ainsi qu'il sera exposé plus loin, la possibilité de remédier à leurs propres inconvénients; il serait absolument impossible de songer à un remède de quelque efficacité avec l'ancien système des bouches d'égout multiples réparties sur chaque rive.

2° Causes secondaires. Petits égouts; eaux industrielles

A ce sujet, plusieurs membres ont attiré l'attention de la commission sur les causes l'infection qui subsistent encore en amont même du débouché des collecteurs; ces causes ont certainement secondaires à l'heure présente, en regard de l'afflux considérable des ollecteurs; elles ne produisent pas d'altération bien profonde du fleuve, et des prises 'eau pour l'alimentation publique peuvent fonctionner sans inconvénient pratique à hoisy, au pont d'Austerlitz, à Chaillot, à Suresnes. Mais déjà, d'après les recherches 'un membre de la commission, M. Boudet, on constaterait à la traversée de Paris une iminution sensible dans l'aération des eaux de la Seine, corollaire de l'existence d'une ose non négligeable de matières organiques. On trouverait, en effet, dans un litre d'eau e Seine les quantités suivantes d'oxygène (centimètres cubes) :

Amont de Paris.

Amont de Corbeil.	9,32
Aval de Corbeil.	8,77
Barrage d'Évry.	7,55
Choisy-le-Roi.	7,52
Barrage du Port-à-l'Anglais.	8,80
Pont d'Ivry.	9,50

Azote organique, 0 gr., 53 par mètre cube.

Traversée de Paris.

Pont de la Tournelle.	8,05
Viaduc d'Auteuil.	5,99

Azote organique, 0 gr., 56 par mètre cube.

Aval de Paris.

Pont de Billancourt.	5,69
Pont de Sèvres.	5,40
Pont d'Asnières.	5,54

Azote organique, 0 gr., 25 par mètre cube.

On aperçoit une diminution d'oxygène vers Choisy-le-Roi, un accroissement après la chute du barrage de Port-à-l'Anglais, puis une diminution progressive à la traversée de Paris, et au delà jusqu'à Asnières. Les rives de la Seine, malgré l'immense service que leur rendent les collecteurs, restent, en effet, soumises aux causes suivantes d'altération :

Au-dessus de Corbeil, eaux industrielles de l'Essonne.

En amont de Paris, de Choisy-le-Roi aux fortifications :

10 établissements insalubres, tels que : féculerie, maroquinerie, lavage de feutres et de laines, teintureries, fabriques de produits chimiques, de caoutchoucs, de poudrette, usines métallurgiques; plus 6 égouts amenant en Seine les eaux des communes de Choisy, Maisons, Charenton, Vitry, Ivry.

Dans la traversée de Paris, 15 égouts de rive non encore réunis aux collecteurs, plus les égouts des îles de la Seine et les bateaux à lessive, ces derniers, au nombre de 24, déversant chaque année en Seine 176 tonnes de sel de soude et 132 tonnes de savon.

En aval de Paris, jusqu'à Asnières, 10 égouts faisant le service de Billancourt, Sèvres, Suresnes, Puteaux, Neuilly, Courbevoie, Asnières ; ces égouts sont souvent chargés d'eaux industrielles, et l'un d'eux formé de l'ancien rû de Marivel recouvert, déverse sur la rive droite du fleuve les eaux vannes du dépotoir de la ville de Versailles. De Clichy à Saint-Denis, on voit même s'ajouter à l'action des collecteurs celle de 7 égouts (Clichy, Saint-Ouen, Saint-Denis) et 15 usines, fabriques de produits chimiques, savons, bougies, gants, colle, féculeries, tanneries, etc. Enfin, la commission a constaté, dans sa tournée du 11 octobre, l'afflux infect que le Croult déverse à Saint-Denis, après avoir servi d'exutoire aux nombreuses usines de la localité.

La commission ne pouvait négliger absolument ces faits secondaires d'infection ; si aujourd'hui ils laissent la Seine suffisamment pure avant les collecteurs, s'ils sont en quelque sorte masqués par les faits prédominants dus aux eaux de ces collecteurs, ils pourraient, par leur multiplication, reproduire sur une échelle restreinte les inconvénients que la commission vient d'analyser au-dessous de Clichy ; déjà leur influence semble se faire sentir sur l'aération de l'eau de la Seine dans la traversée de Paris ; il convient donc de signaler ces exutoires secondaires et de leur appliquer, soit directement, soit par la réunion aux collecteurs développés, les procédés d'épuration que la commission se propose actuellement d'examiner et d'apprécier dans la seconde partie de son travail.

DEUXIÈME PARTIE

EXAMEN ET CHOIX DES MESURES A PRENDRE POUR REMÉDIER A L'INFECTION DE LA SEINE

Examen et choix des mesures à prendre. Principes

L'examen et le choix des mesures à prendre pour remédier à l'infection de la Seine constituaient la partie la plus importante et la plus délicate du travail de la commission. Les intérêts engagés sont en effet considérables ; d'une part, il convient de laisser à une ville de 2 millions d'habitants comme Paris toutes les facilités désirables pour son assainissement intérieur, pour la disparition prompte et libre de tous les détritus qu'engendre la vie journalière d'une pareille agglomération d'individus ; d'autre part, il ne saurait être conforme à l'équité de faire retomber sur un point spécial de la banlieue tous les inconvénients dont la ville de Paris s'est déchargée, ou du moins faut-il chercher à atténuer et même faire disparaître, s'il est possible, ces fâcheuses conséquences extérieures de l'assainissement intérieur de la cité.

La commission, tout en maintenant fermement les principes, devait donc apporter dans l'examen des procédés et dans ses conclusions la mesure que lui imposait l'importance même de la question ; elle devait s'arrêter, avant tout, à des faits et à des remèdes pratiques.

C'est dans cet esprit qu'a été sommairement traitée la question de légalité que soulève l'écoulement en Seine des eaux des collecteurs.

Ainsi que M. le ministre l'a lui-même indiqué dans sa lettre du 22 juillet 1874 à M. le préfet de la Seine, les textes sont formels pour interdire l'écoulement ou le déversement d'immondices dans les fleuves ou rivières et spécialement en Seine.

Mais à côté du droit strict pour l'administration d'intervenir et d'édicter des prescriptions coercitives, conformes aux textes légaux, il convient de constater combien la pratique, généralement tolérée en France, est peu en corrélation avec la netteté des lois et règlements. Presque partout les industriels et les municipalités ont considéré les cours d'eau comme des réceptacles de détritus. On conçoit qu'il faille tenir aujourd'hui compte des nécessités de l'industrie ou de la salubrité intérieure des villes avant de prescrire l'application trop hâtive de procédés d'assainissement encore bien neufs.

Si donc l'intensité des faits constatés en Seine doit attirer immédiatement l'attention de l'administration supérieure sur la responsabilité qui incombe à la ville de Paris et que celle-ci ne décline pas, la commission pense qu'il convient à la fois de généraliser les remèdes qui peuvent être prescrits en les étendant à d'autres espèces et d'apporter en exécution tous les ménagements nécessaires. Sans s'arrêter à une discussion de stricte légalité, elle insiste sur l'infection qui existe en fait en Seine, dans une partie populeuse de la banlieue, au voisinage des prises d'eau de Saint-Ouen, de Saint-Denis, d'Épinay, de Marly, du Vésinet, de Saint-Germain, de Maisons-Laffite, et, se rangeant à l'avis émis par le conseil des ponts et chaussées en 1870, elle pense que : « l'écoulement en Seine des eaux des collecteurs de Clichy et de Saint-Denis a, au point de vue de la salubrité, des inconvénients auxquels la ville de Paris est tenue de remédier. »

Enlèvement des détritus solides. Draguages. Leur insuffisance au point de vue de l'assainissement du fleuve

Abordant l'examen des remèdes à apporter à la situation présente, la commission, sous réserve des procédés plus radicaux qu'elle examinera ci-dessous, doit insister sur l'absolue nécessité de continuer les vigoureux draguages qui combattent l'encombrement de

la Seine aux embouchures des collecteurs : indépendamment des questions de salubrité publique, il y a là une nécessité urgente au point de vue de la navigation. On a vu, dans la première partie du rapport, que les collecteurs versent en Seine, par an, 150,000 tonnes en poids de matières solides, soit un volume vaseux de 200,000 à 300,000 mètres cubes. Les parties les plus lourdes forment les bancs qui émergent périodiquement et que le service de la navigation a dragués depuis quelques années dans les proportions suivantes :

	Mètres cubes. Nombres ronds.
1868	69,000
1869	58,000
1870	57,000
1871	64,000
1872	66,000
1873	82,000

En 1874, le budget de la ville de Paris portait un crédit de 180,000 francs pour les draguages aux embouchures des collecteurs. Mais ces opérations, exécutées sur les saillies des bancs d'atterrissement, appliquées du reste à des cubes inférieurs à l'apport annuel des collecteurs, ne peuvent éviter le comblement des bas-fonds et l'encrassement progressif du lit du fleuve par les vases et les matières organiques légères : de là, l'extension et l'accroissement annuel des phénomènes de fermentation dans les profondeurs mêmes du courant, pollué à la surface par les matières fermentescibles dissoutes. La commission ne saurait donc voir dans les draguages qu'un palliatif provisoire dont elle recommande l'application incessante, mais qui ne peut, à aucun titre, être érigé en solution de la question.

Systèmes divers proposés pour l'assainissement de la Seine. Réfutation

La commission ne pouvait davantage s'arrêter à un certain nombre de systèmes, émis par diverses personnes et dont la seule nomenclature montrera l'inanité :

1° *Prolongement des égouts collecteurs jusqu'à la Seine maritime ou jusqu'à la mer.* — Ce projet entraînerait à des dépenses énormes, tout en reportant simplement l'infection sur un point de nos côtes.

2° *Prolongement des égouts collecteurs jusqu'au confluent de l'Oise.* — L'augmentation de débit due à l'Oise ne ferait qu'étendre et déplacer l'infection sans en détruire les causes prédominantes, c'est-à-dire les matières fermentescibles.

3° *Dilution des eaux d'égout dans l'intérieur des collecteurs ou à leur débouché par addition d'eau claire.* — La dilution aurait simplement pour effet, comme ci-dessus, d'étendre l'infection sur un espace plus considérable. Ce procédé, comme les deux précédents, ne permettrait, du reste, aucune utilisation par l'agriculture des matières fertilisantes contenues dans les eaux d'égout.

4° *Filtration des eaux d'égout à travers des substances diverses.* — Cette opération donne toujours un résultat incomplet : les matières solides argileuses et les matières dissoutes passent à travers les filtres. Ceux-ci exigent un entretien continuel et constituent, avec leurs bassins annexes, un danger sérieux pour la salubrité publique. L'opération est en même temps coûteuse spécialement au point de vue de l'exploitation.

5° *Établissement, aux débouchés des collecteurs, de grands bassins de décantation par simple action de la pesanteur.* — Il faudrait donner aux bassins de très-grandes dimensions, créer par suite de vastes foyers d'infection ; l'épuration par simple action de la pesanteur serait des plus imparfaites, et le maniement des dépôts présenterait de graves inconvénients.

Épuration par les procédés chimiques et spécialement par le sulfate d'alumine
Insuffisance et cherté du système

Les objections qui viennent d'être indiquées s'appliquent, au moins en partie, aux systèmes divers dans lesquels la précipitation des matières solides est hâtée par l'addition de réactifs chimiques. Les eaux d'égout, renfermant des matières minérales ou organiques très-diverses qui leur donnent généralement une réaction alcaline, se prêtent à des opérations chimiques dont elles deviennent un des éléments; si l'on arrive à produire dans leur sein un précipité gélatineux ou floconneux, ce précipité peut tomber au fond de bassins convenablement disposés, entraînant avec soi les matières solides contenues dans le liquide impur et laissant échapper par un déversoir d'aval une eau suffisamment claire. Sur la proposition de M. l'inspecteur général des mines Le Chatelier, la ville de Paris a fait des essais prolongés et multipliés sur le sulfate d'alumine, qui semblait présenter pour les eaux d'égout des collecteurs des avantages pratiques sur la chaux et autres réactifs préconisés soit en France, soit en Angleterre. Des bassins d'épuration ont été établis au premier champ d'essai qui fonctionnait à Clichy en 1867-1869; d'autres bassins, plus vastes et mieux installés, existent encore dans la plaine de Gennevilliers sur les terrains que possède la ville de Paris. Dans sa tournée du 11 octobre, la commission a pu voir fonctionner un de ces bassins, et l'eau qui s'en échappait était parfaitement claire. 600,000 à 700,000 mètres cubes d'eau d'égout ont subi, à diverses reprises, ce traitement, et sont sortis clarifiés des bassins. Mais il y aurait une erreur profonde à confondre ces eaux ainsi clarifiées avec des eaux réellement épurées. Le sulfate d'alumine, après s'être décomposé en présence de l'alcalinité des eaux d'égout et avoir donné de l'alumine à l'état de gélatine grenue, effectue simplement une opération mécanique de collage; les matières solides sont entraînées au fond des bassins; les matières dissoutes, y compris les matières organiques fermentescibles, restent dans l'eau claire. C'est ce que l'analyse chimique démontre surabondamment; le tableau suivant donne en effet le résumé d'analyses poursuivies pendant les années 1867-1868 :

	Eau d'égout naturelle.	Eau épurée au sulfate d'alumine.
Azote.	0k037	0k021
Matières volatiles et combustibles. . . .	0,729	0,240
Matières minérales..	2,038	0,724
TOTAL.	2k804	0k985

L'eau épurée contient donc les deux tiers de l'azote total de l'eau d'égout, et le tiers des matières volatiles ou combustibles, lesquelles sont en grande partie organiques. Ces faits ne sont pas, du reste, particuliers au sulfate d'alumine : le docteur Frankland, chargé par le gouvernement anglais d'une étude générale sur la pollution des rivières, a trouvé, en soumettant à l'analyse les divers réactifs proposés et essayés, qu'ils ne faisaient disparaître en moyenne que les 0,57 de l'azote organique contenu dans les eaux d'égout, laissant dans les eaux clarifiées les 0,63 de ce même azote. Il convient d'ajouter, à la décharge du sulfate d'alumine, qu'il renferme habituellement un excès d'acide sulfurique, que cet acide agit comme un antiseptique pour retarder la fermentation, et que les eaux clarifiées ne présentent plus les décompositions intenses qu'offrait l'eau d'égout à l'état naturel. Mais elles sont encore loin de pouvoir servir aux usages domestiques les plus simples; elles n'ont aucun caractère des eaux potables, et leur introduction dans le fleuve, tout en constituant une amélioration sur l'état actuel, ne saurait être considérée comme absolument inoffensive. D'ailleurs, appliqué en grand, le procédé laisserait des masses énormes de dépôts boueux dans les bassins : on se rappelle que le cube annuel des vases d'égout n'est pas inférieur à 200,000 mètres cubes. Se représente-t-on cette quantité énorme, séchant sur plusieurs hectares de superficie, maniée ensuite pour être chargée soit sur des voitures, soit en bateau? Ces dépôts ont-ils, du reste, une forte valeur agricole? Aucunement : ils dosent aux 1,000 kilogrammes 6 à 8 kilogrammes seulement

d'azote perdus dans une masse de matières minérales ou terreuses; une longue pratique a montré que ces dépôts ont la valeur agricole des terreaux de bonne qualité ou de la gadoue consommée, produits avec lesquels ils ont la plus grande similitude. La valeur vénale de ces engrais ne dépasse guère, rendus à pied d'œuvre, 6 à 8 francs la tonne. Or, que coûterait cette même tonne de résidus des bassins? En réactifs seuls, elle aurait absorbé pour sa production 8 à 10 francs, c'est-à-dire tout ce qu'elle vaut, sans même compter les frais d'élévation des eaux, la manipulation des dépôts, leur transport, etc., opérations qui augmenteraient encore la dépense dans de notables proportions. La question financière suffirait à elle seule pour empêcher de songer sérieusement à l'application du système à la totalité des eaux d'égout. La longue expérience de la ville de Paris ne permet pas d'espérer une dépense d'épuration inférieure à 1 centime par mètre cube traité; ce serait donc par an une dépense de 1 million de francs pour les 100 millions de mètres cubes vomis par les collecteurs, rien qu'en réactifs. Il resterait à ajouter tous les autres frais, élévation des eaux, etc. Une pareille dépense est absolument hors de proportion avec le résultat imparfait obtenu.

La commission, à l'unanimité de ses membres, a donc été d'avis que l'épuration par les procédés chimiques ne pouvait constituer une solution générale et pratique de la question. Elle ne peut lui donner un autre caractère que celui d'un palliatif cher et imparfait. On examinera, dans la suite de ce rapport, si, dans certains cas particuliers, la clarification chimique ne peut pas rendre quelques services comme complément provisoire et temporaire des solutions vraiment complètes de l'assainissement des eaux impures.

Assainissement de la Seine par l'action combinée du sol et de la végétation
Irrigation à l'eau d'égout

C'est dans l'action combinée du sol et de la végétation que la commission pense qu'il convient de chercher uniquement ces solutions. Par l'irrigation pratiquée sur un sol perméable, les eaux d'égout deviennent non-seulement inoffensives, mais productives et fertilisantes : la salubrité publique reçoit toute satisfaction, et du même coup la culture retrouve une source d'engrais anéantis jusqu'ici en pure perte.

La commission est arrivée sur ce point à une conviction unanime qui lui semble justifiée par les considérations et observations suivantes :

Principe et théorie du système

Lorsque des eaux impures, chargées à la fois de matières suspendues et de matières dissoutes, sont versées sur un sol perméable, la couche superficielle de ce sol commence par jouer le rôle de « filtre » : toutes les matières suspendues sont séparées par une action simplement mécanique. Sans sortir des expériences de laboratoire, la commission a pu constater au bureau du service municipal, à Clichy, qu'une grande caisse de 2 mètres de hauteur ou même un simple vase en verre de 50 centimètres, remplis de terre et de sable caillouteux de la plaine de Gennevilliers, suffisait pour clarifier complétement et pendant des mois entiers les eaux d'égout les plus chargées versées à leur surface. On connaît les grands phénomènes de filtration permanente que présentent certains terrains : c'est ainsi qu'un des membres de la commission a pu citer les alluvions du pays de Caux, ou 5 à 6 mètres de limon, déposés au-dessus d'une couche de craie fendillée, n'ont jamais empêché la perméabilité constante du terrain. Après ce filtrage mécanique superficiel, les eaux traversent, clarifiées, les couches supérieures du sol; là elles rencontrent les radicelles des plantes qui absorbent à leur profit les substances fertilisantes qui restaient encore à l'état de dissolution et maintenaient aux eaux, malgré leur clarté, une réelle impureté. Si l'on cherche, à l'aide de l'analyse, les quantités d'eaux d'égout nécessaires pour fournir à certaines plantes maraîchères les éléments essentiels à un bon rendement, tels que l'azote, les alcalis ou l'acide phosphorique, on trouve qu'il faut environ

15,000 mètres cubes d'eau d'égout à l'hectare ; donc, pour entretenir trois récoltes successives de ces produits, il faut au minimum 45,000 mètres cubes d'eau d'égout, sans compter les pertes et les quantités absorbées par les plantes parasites ; ce sont donc 45,000 mètres cubes qui se trouvent dépouillés au profit de la culture des éléments qui précisément altéraient la pureté des eaux. Au cas où la culture ne serait pas aussi intensive et n'offrirait pas aux eaux d'une manière aussi continue les organes absorbants des végétaux, le sol se charge de retenir, à lui seul, au passage, la majeure partie des éléments fertilisants : 80 pour 100 du carbonate d'ammoniaque, 74 pour 100 du carbonate de potasse, etc. Enfin, pour les eaux qui auraient échappé, soit à l'action absorbante des plantes, soit à l'action retentive du sol, elles suivent leur marche descendante, au cas où le sous-sol est naturellement ou artificiellement perméable. Elles subissent, dans les couches de ce sous-sol, une action oxydante qui agit puissamment sur les matières azotées et les fait passer de l'état de substances organiques à l'état d'azotates ou azotites, substances purement minérales, n'offrant plus aucun danger de fermentation, absolument inoffensives lorsqu'elles sont diluées dans un volume d'eau suffisant. C'est ainsi que l'analyse chimique a appris que les eaux sortant des appareils d'expérience déjà cités plus haut ne renfermaient plus de traces sensibles d'azote décomposable, tandis qu'elles dosaient en moyenne 43 grammes d'azote total par mètre cube avant de traverser le sol ; on n'y trouvait plus qu'une très-faible dose d'azote à l'état d'ammoniaque minérale : 1^{gr},600 en moyenne ; c'est ce que la Seine renferme avant d'être atteinte par l'afflux infect des collecteurs. On y constatait, au contraire, des doses notables de nitrate, qui se sont élevées jusqu'à un chiffre correspondant à 41 grammes d'azote au litre, lorsque aucune végétation n'existait à la surface. Le mouvement de descente à travers un sol poreux assure même aux eaux effluentes une aération satisfaisante ; l'eau d'égout versée à la surface du sol dans les expériences de Clichy contenait à peine 2 centimètres cubes d'oxygène au litre : elle sort d'une couche de terrain caillouteux de 2 mètres d'épaisseur avec un titre de 7 à 10 centimètres cubes. C'est dans cet état de revivification complète que l'eau d'égout, *épurée* cette fois et non plus seulement *clarifiée*, va retrouver les eaux des nappes souterraines ou s'écoule dans des drains, lorsque ceux-ci ont été établis dans les sols d'une perméabilité naturelle insuffisante. L'enquête anglaise sur la pollution des rivières est arrivée à ces mêmes conclusions, grâce aux savantes recherches du docteur Frankland.

Application faite par la ville de Paris dans la plaine de Gennevilliers

La commission a examiné avec attention les procédés appliqués par la ville de Paris dans la plaine de Gennevilliers pour réaliser pratiquement et sur une grande échelle les phénomènes qui viennent d'être analysés.

Répétant en les développant les procédés expérimentés dès 1867-1868, par M. l'inspecteur général Mille, dans un champ d'essai installé alors à Clichy, les ingénieurs du service municipal de la ville de Paris ont commencé en juin 1869 l'irrigation de la plaine de Gennevilliers.

Les eaux d'égout sont élevées à Clichy à l'aide de pompes centrifuges qui, par l'absence de clapets, ont l'avantage de permettre le libre passage des corps solides charriés par le courant des collecteurs. Des machines à vapeur d'une force de 40 chevaux jusqu'en 1873, et aujourd'hui d'une force de 150 chevaux, actionnent ces pompes, refoulent les eaux à 11 mètres de hauteur environ, dans des conduites métalliques de 60 centimètres et de 1^{m},10 de diamètre, qui gagnent la plaine de Gennevilliers en passant sous les trottoirs du pont de Clichy. Du côté du collecteur départemental, une dérivation maçonnée de 1^{m},60 de hauteur sur 90 centimètres de largeur aux naissances, a été établie entre la porte de la Chapelle et le pont de Saint-Ouen. Les cotes du terrain permettent d'amener par cette dérivation, grâce à la seule pesanteur et après un parcours de 3,300 mètres, toutes les eaux d'égout sorties de Paris de ce côté. La machine à vapeur de Clichy peut refouler en service normal 0^{m},500 à la seconde, soit 44,000 mètres cubes par jour ; la dérivation de

Saint-Ouen débite au besoin un cube égal. Les eaux des deux sources alimentaires viennent aujourd'hui se réunir dans une longue rigole en briques de 2 mètres de largeur et 1,500 mètres de longueur, établie sur les digues d'Asnières et de Gennevilliers; une conduite foncée en maçonnerie de 60 centimètres de diamètre et 1,950 mètres de longueur, une rigole en briques de 1m,20 de large et de 2,250 mètres de long, et 15 à 20 kilomètres de fossés en terre complètent le réseau de distribution. Ce réseau enserre une surface arrosable de 143 hectares. Sur ces 143 hectares, 115 avaient fait usage de l'eau d'égout au 1er octobre dernier. La répartition sur le sol se pratique à l'aide de raies séparées par des billons plus ou moins larges; ces raies se tracent : en plein champ, à la charrue; dans les parcelles passées à l'état de jardin, à la bêche et au cordeau.

Les plantes poussent sur les billons : leurs radicelles seules vont chercher l'humidité et l'engrais au voisinage des rigoles; les parties vertes des plantes ne sont jamais touchées par l'eau d'égout. En automne et en hiver il est quelquefois procédé à de vrais colmatages par submersion partielle des pièces à fumer, mais le plus souvent l'engraissement du sol dépourvu de végétation se fait également par rigoles et imbibition. Les quantités d'eau d'égout absorbées par les terrains de la plaine de Gennevilliers se sont élevées, depuis 1869, à plus de 18 millions de mètres cubes, savoir :

	Mètres cubes Nombres ronds.
1869.	650,000
1870.	810,000
1871. (Guerre et Commune.	»
1872.	1,500,000
1873.	7,200,000
1874.	8,000,000
TOTAL.	18,170,000

Les doses annuelles à l'hectare ont varié de 50,000 à 100,000 mètres cubes.

Des bassins d'épuration avaient été installés en 1869 sur un terrain appartenant à la ville de Paris; après avoir clarifié, en 1869, 320,000 mètres cubes, et, en 1870, 97,000 mètres cubes d'eau d'égout, ces bassins ont cessé de faire un service courant en présence du développement de l'irrigation; ils subsistent aujourd'hui à l'état expérimental. Les dépôts extraits de ces bassins ont été employés dans les environs par les procédés d'enfouissage et aux doses usitées pour les gadoues des rues de Paris. Une partie des draguages exécutés en Seine est venue s'ajouter à ces dépôts et les remplace aujourd'hui dans les usages de la culture; le service de la navigation a ainsi déposé sur les terrains municipaux :

	Mètres cubes Nombres ronds.
1871.	24,000
1872.	18,000
1873.	13,600

Ces dépôts sont exploités par un industriel qui, moyennant une redevance de 1,000 francs payée à la ville, les expédie et les revend à Colombes, Chatou, le Vésinet et autres localités voisines des rives de la Seine.

Résultats obtenus dans la plaine de Genneviliers

La commission a examiné, tant au point de vue de la salubrité qu'au point de vue économique, les résultats de l'opération dont les traits principaux viennent d'être esquissés. Elle a pu d'abord constater combien les terrains de la plaine de Gennevilliers étaien propices à l'opération entreprise : ces terrains sont formés, en effet, d'une vaste couche

d'alluvion de 7 à 10 mètres d'épaisseur, contournée par la Seine; cette alluvion est composée de sables et cailloux recouverts d'une couche généralement mince de terre végétale. C'est au-dessous de cette masse perméable que règnent les couches qui arrêtent les eaux d'infiltration. Celles-ci forment une vaste nappe souterraine descendant des hauteurs du Mont-Valérien et de Buzenval vers la Seine et se tenant entre 2 et 4 mètres au-dessous de la surface du sol. La plaine de Gennevilliers constitue donc un immense filtre naturel, éminemment propre à absorber et purifier les eaux impures.

La commission a vérifié que la pratique justifiait ces présomptions théoriques; elle a vu sur les parois de carrières ouvertes dans la plaine une mince couche de terre arable sous laquelle se trouvaient des bancs de sable, cailloux et graviers, lesquels conservaient leur couleur naturelle sans montrer la moindre trace de dépôt noir de matières organiques, preuve palpable que la couche superficielle agissait bien comme un filtre énergique sur les eaux boueuses versées sur les champs irrigués. La commission a fait tirer devant elle l'eau de puits établis au milieu des terrains irrigués; cette eau était parfaitement limpide, sans saveur spéciale, identique, comme aspect et comme goût, aux eaux sulfatées de la nappe souterraine qui alimente les puits de toute la plaine comprise entre Rueil, Courbevoie et la Seine. Elle a fait des constatations identiques sur l'eau sortie d'un drain établi dans une portion du jardin d'essai de la ville de Paris et débouchant en Seine. Ces eaux, soumises à l'analyse chimique, ont été reconnues comme parfaitement pures de matières fermentescibles ; on a trouvé, en effet :

	Azote organique en grammes par mètre cube.	Azote total au mètre cube.
Eau du puits du jardin de la ville. . .	0gr,10	0gr,50
Eau du drain du jardin de la ville. . .	Traces insensibles	0,35

Ces eaux sont plus pures que celles de la Seine en amont des collecteurs, lesquelles renferment 85 centigrammes d'azote organique et 1gr,5 d'azote total; elles sont même supérieures à leurs similaires extraites de puits situés dans la même nappe, mais en dehors du périmètre irrigué, dans des terrains naturellement moins perméables et moins propres à l'oxydation ; elles sont assimilables, pour la pureté chimique, aux eaux des sources d'Arcueil. C'est ce que montrent les chiffres suivants, correspondant à des puits voisins des stations de Courbevoie et de Colombes et à un échantillon d'eau d'Arcueil.

	Azote organique.	Azote total.
Puits de Courbevoie.	0gr,23	0gr,77
Puits de Colombe.	0,23	0,83
Eau d'Arcueil.	0,05	0,43

L'eau sortant du drain présente même une aération satisfaisante supérieure à celle de la Seine en amont des collecteurs : 6 centimètres cubes à 6cc,5 par litre. Dans les puits, là où la nappe n'est pas mise artificiellement en mouvement, la dose d'oxygène est moindre, 2 centimètres cubes à 3 centimètres cubes : c'est le phénomène que présentent les nappes soit dans les environs (puits d'Asnières, 3cc,6 ; puits de Clichy, 1 centimètre cube à 4cc,6), soit du côté de Saint-Denis (2cc,40, puits de Gonesse ; 3 centimètres cubes, Aubervilliers, etc.).

La commission ne peut donc que témoigner de l'action évidente actuelle du sol de la plaine de Gennevilliers. Elle ne pense pas du reste que cette action puisse prochainement s'arrêter par encrassement ; les grands phénomènes de filtration naturelle et spécialement ceux du pays de Caux, cités précédemment, permettent de croire à une perméabilité constante, même après la formation de bancs limoneux de plusieurs mètres d'épaisseur; or, la couche moyenne de dépôts effectués par la pratique de l'irrigation à Gennevilliers n'atteint pas 0,001 par an; les dépôts, ainsi qu'a pu le constater *de visu* la commission, ne sont pas gras et encrassants; renfermant 50 pour 100 de matières siliceuses, ils sont friables et perméables par eux-mêmes; les façons de la culture les incorporent chaque année au sol et ont simplement pour résultat l'entretien ou l'accroissement d'une couche

de terre arable légère. Ce mécanisme de l'absorption des eaux et de l'incorporation des dépôts au sol avec utilisation par les plantes garantit en même temps de tout inconvénient au point de vue de la salubrité des localités environnantes. L'eau ne séjourne nulle part, et les phénomènes de fermentation ou d'oxydation s'accomplissent dans le sein de la terre, au lieu de se produire en Seine. La commission a pu voir autour du terrain municipal où commencèrent les cultures en 1869 tout un village de récente création : aucune affection spéciale ne s'est produite dans ce village, nommé les Grésillons, et l'accroissement journalier de cette localité naissante, au milieu même des champs où circule l'eau d'égout, est la meilleure preuve de l'innocuité du système. Quelques carriers ont prétendu que le niveau de la nappe qu'on rencontrait de tout temps à une faible profondeur au-dessous du sol se serait relevé depuis les irrigations; ces plaintes, nées au moment des inondations de 1872-1873, à un moment où le service d'irrigation ne fonctionnait pas, ne portent du reste que sur un fait purement mécanique qui n'intéresse à aucun titre le principe même ou le résultat hygiénique de l'opération; c'est un point de détail dont l'examen revient aux agents de la ville de Paris et auquel il serait facile de remédier par quelques drains, si, contrairement aux faits actuels, une pareille surélévation venait à se produire d'une manière permanente[1].

Quant au résultat agricole et économique, la commission a pu constater l'état prospère des cultures irriguées; elle a vu, dans un certain nombre de parcelles et spécialement sur le domaine municipal, comprenant 5 à 6 hectares loués à divers industriels, les produits les plus variés, depuis les légumes de toutes espèces jusqu'aux fleurs et aux fruits. Dans les terrains courants de la plaine, la culture des légumes est prédominante : les champs de choux et d'artichauts ont spécialement attiré l'attention de la commission. Un certain nombre de terrains sont consacrés à des plantes industrielles, parmi lesquelles on remarque la menthe poivrée, distillée dans l'usine voisine d'un parfumeur, M. Chardin-Hadancourt. Sur les limites du périmètre irrigué, la grande culture emploie les eaux comme fumure ou comme arrosage d'été; des seigles coupés en vert, des betteraves à bestiaux, des légumes et enfin quelques prairies voisines du bord de la Seine sont soumis à l'irrigation; les luzernes présentaient encore, au mois d'octobre, au moment de la visite de la commission, un aspect vivace et en étaient à leur quatrième ou cinquième coupe; les betteraves à bestiaux s'exploitaient et donnaient des rendements voisins de 100,000 kilogrammes à l'hectare. D'après les renseignements transmis par les ingénieurs du service municipal, la valeur locative des terrains irrigués a subi une hausse sensible depuis leur transformation. D'une valeur de 90 francs à 120 francs l'hectare, ils ont atteint 200 francs, 300 francs et même 400 francs. La ville de Paris loue son domaine à raison de 5 centimes du mètre carré, soit 500 francs l'hectare. Ces faits expliquent comment, à mesure que la ville étend ses conduites et rigoles, les cultivateurs usent des eaux mises à leur disposition; c'est ainsi que la surface irriguée a suivi le développement progressif qu'indique le tableau ci-dessous :

[1] Par une lettre adressée le 31 octobre 1874 à M. le ministre des travaux publics et renvoyée à l'examen de la commission, MM. Pommier et C^ie^, fabricants de produits chimiques à Gennevilliers, se sont fait l'écho de ces plaintes. MM. Pommier ont été les fournisseurs de sulfate d'alumine de la ville de Paris tant que la ville a dû expérimenter l'épuration chimique. Dans un projet de pétition joint à leur lettre sans autres signatures que la leur, MM. Pommier insistent vivement sur les avantages qu'offrirait, suivant eux, le système de l'épuration chimique; ils reconnaissent qu'il est vrai que « les eaux d'égout ont amené la fertilisation de la plaine des Grésillons ; mais ils signalent en termes généraux les inconvénients et les dangers que présenterait le système des irrigations et insistent spécialement sur une prétendue inondation des caves et des carrières ». La commission ne peut que s'en référer aux considérations développées dans le corps du rapport; si les irrigations causaient un dommage bien et dûment constaté, les personnes atteintes auraient toujours, comme dans le cas d'un travail quelconque, la possibilité d'avoir recours aux tribunaux compétents. Ce ne sont pas quelques froissements d'intérêt privé qui peuvent et doivent arrêter une œuvre aussi considérable de salubrité publique, vivement réclamée par les riverains de la Seine, comme en font foi deux pétitions émanées des industriels de Clichy et du Conseil municipal d'Épinay, et renvoyées également à la Commission.

ANNÉES	MOIS	LONGUEUR des rigoles et conduites maîtresses en dehors du domaine municipal	SURFACES soumises aux eaux d'égout
			h. a. c.
1869	»	»	6 58 82
1870	»	»	21 82 73
1871	»	Guerre et Commune	
1872	Juillet	2,770	45 41 32
	Novembre	3,877	51 17 52
1873	Mai	4,000	62 3 92
	Décembre	5,700	88 35 42
1874	Août	5,700	115 52 60

La surface de 115 hectares correspond actuellement aux 143 hectares seuls arrosables à l'aide du réseau établi ; tout porte à croire que l'irrigation se développera au moins dans la même proportion, à mesure que les artères de distribution seront poussées plus avant. La commission croit, du reste, devoir insister sur ce fait que le développement progressif des irrigations s'est produit par le libre jeu de l'intérêt privé, sans que la ville de Paris intervînt à aucun titre par voie de coercition ou d'expropriation.

De l'étude des faits constatés dans la plaine de Gennevilliers, aussi bien que des considérations théoriques, est donc résultée pour la commission la conviction absolue que le seul remède à l'infection produite en Seine par les eaux des collecteurs consiste dans l'emploi agricole de ces eaux en irrigations, et que le système pratiqué sur un sol perméable comme celui de la presqu'île de Gennevilliers et appliqué aux cultures maraîchères et industrielles ou aux prairies, se prête à une exploitation prolongée sans faire courir aucun risque à la salubrité des localités irriguées.

Application à la totalité des eaux des collecteurs. Projets de la ville de Paris

La commission, s'appuyant sur les faits constatés et sur les principes qui en découlaient naturellement, a dû se préoccuper de savoir comment l'opération en cours d'exécution à l'origine de la plaine de Gennevilliers pouvait se développer et s'appliquer à la totalité des eaux des collecteurs. Ceux de ses membres qui représentaient spécialement l'administration et le conseil municipal de la ville de Paris lui ont fourni les renseignements suivants :

Un premier crédit de 1 million, voté le 2 mars 1872, a permis d'établir le système qui fonctionne aujourd'hui et qui comprend :

Les galeries de dérivation entre la Chapelle et Saint-Ouen (collecteur départemental), entre le collecteur de Clichy et l'usine élévatoire	453,000
La première partie de l'usine élévatoire, y compris acquisition du terrain pour l'usine entière, prise d'eau en Seine, etc.	381,000
Conduite métallique définitive pour traversée de la Seine, aux ponts de Clichy et de Saint-Ouen	166,000
TOTAL	1,000,000

A l'aide d'un second crédit de même importance inscrit au budget de 1874, applicable à des projets approuvés par le conseil municipal dans ses séances des 5 et 20 novembre 1874, il sera incessamment établi sur le territoire de la commune de Gennevilliers un réseau complet comprenant 10,910 mètres de conduites en maçonnerie, de diamètre variant entre 60 centimètres et $1^{m},25$. Ce réseau permettra de porter l'eau d'égout en un point quelconque de la plaine de Gennevilliers, dans la partie comprise entre la Seine et la dépression de terrain qui, sous le nom de Fossé-de-l'Aumône, s'étend

presque en ligne droite de Clichy à Argenteuil. Ces travaux sont estimés 750,000 francs. La surface comprise dans les limites indiquées est de 1,200 à 1,300 hectares, sur lesquels on peut compter 1,000 hectares accessibles aux eaux, défalcation faite des non-valeurs, habitations, chemins, etc. Ces 1,000 hectares exigeront, à la dose reconnue pratique de 50,000 mètres cubes par hectare et par an, 50 millions de mètres cubes, soit la moitié environ du cube total des collecteurs.

Ces 50 millions de mètres cubes seront fournis par la dérivation de Saint-Ouen, par la machine actuelle de Clichy de 150 chevaux et par une nouvelle machine de 250 chevaux, dont le prix d'établissement avec son bâtiment sera de 250,000 francs, chiffre qui absorbera le reste des crédits ouverts en 1874, défalcation faite des 750,000 francs destinés aux conduites maîtresses de distribution. Le système sera complété par la construction d'une cheminée en briques à l'usine, au lieu de la cheminée actuelle qui est provisoire et en tôle (25,000 francs), par l'établissement d'une ligne complète de conduites de 1m,10 entre l'usine et l'origine du pont de Clichy, partie où le service est fait actuellement par d'anciennes conduites de 60 centimètres (90,000 francs) et enfin par des travaux de distribution secondaire dans la plaine, évalués à 500,000 francs. Ce seront 615,000 francs à imputer soit au budget de 1875, soit sur les fonds de l'emprunt municipal projeté. L'ensemble de ces travaux, représentant une dépense totale de 2,615,000 francs, assurera le service journalier de 1mc,500 à 1mc,700, soit de la moitié aux 3/5 du cube total des collecteurs. Les eaux, détournées du fleuve, seront conduites sur le territoire de la commune de Gennevilliers et consacrées à l'irrigation de 1,000 hectares, suivant les principes et les procédés actuels.

La commission a pris acte avec satisfaction des déclarations des représentants de la ville de Paris. Elle a constaté que les fonds nécessaires à l'opération étaient dès à présent engagés pour la plupart et qu'ainsi l'assainissement rationnel du fleuve pouvait être considéré comme certain, au moins pour la moitié des eaux des collecteurs.

La commission s'est alors préoccupée de la seconde moitié des eaux d'égout, dont la disparition du fleuve pouvait seule résoudre complétement la question d'assainissement. Les ingénieurs du service municipal ont fait remarquer que la plaine de Gennevilliers s'étendait vers l'ouest, au delà du Fossé-de-l'Aumône, vers Colombes, Nanterre et Rueil ; que ces terrains tous inférieurs au niveau des puits de Clichy et de Saint-Ouen, et par suite accessibles aux eaux, comportaient l'application du système indiqué pour le territoire même de la commune de Gennevilliers; qu'entre les centres habités, tels que Colombes, Nanterre, Rueil et la Seine, la surface arrosable était encore de 1,000 à 1,200 hectares et se prêtait, tant par sa configuration topographique et géologique que par la nature même de ses cultures, à l'absorption et à l'utilisation de la dernière moitié des eaux d'égout ; qu'une dépense de 2,385,500 francs, portant à 5 millions la dépense totale nécessaire pour l'assainissement de la Seine, semblait devoir suffire à cette opération ; qu'effectivement l'usine exigerait encore trois machines nouvelles, dont une de rechange, soit 750,000 francs; une nouvelle cheminée et de nouvelles conduites, 115,000 francs ; des conduites maîtresses en maçonnerie, 750,000 francs; des travaux de distribution secondaire, 500,000 francs, et enfin 270,000 francs de somme à valoir.

A la suite de ces explications, la commission a admis, avec les représentants de la ville de Paris, que cette seconde partie de l'opération semblait aussi praticable que la première. Mais elle exigera évidemment un certain temps pour sa réalisation; les travaux proprement dits, machines, usines, conduites, peuvent évidemment être exécutés à bref délai, et les ingénieurs du service municipal ont mis sous les yeux de la commission un programme sommaire d'après lequel l'ensemble des ouvrages principaux et secondaires serait terminé dans une période de cinq années. Mais, dans une œuvre de cette importance, il convient de toujours compter sur des obstacles imprévus; quoique la ville de Paris offre les eaux d'égout gratuitement aux cultivateurs, quoique les faits déjà acquis actuellement démontrent jusqu'à l'évidence le puissant effet agricole de ces eaux et la plus-value qu'elles donnent aux terrains, les habitudes du cultivateur ou même certains intérêts respectables peuvent rendre plus ou moins lent le développement de l'irrigation, qui constitue seul, en fin de compte, l'œuvre d'assainissement de la Seine.

Rôle de l'épuration chimique dans le système à adopter

A ce point de vue et comme mesure transitoire, la commission s'est demandé si l'épuration chimique ne pouvait intervenir pour assurer au moins la clarification des eaux non traitées par l'irrigation. Mais les considérations développées plus haut lui ont fait écarter cette solution comme imparfaite et coûteuse; on se rappelle qu'appliquée à la totalité des eaux d'égoût, elle exigerait une dépense annuelle de 1 million de francs, rien qu'en réactifs; pour la moitié des eaux, la dépense serait encore de 500,000 francs, soit, par an, un dixième du capital total prévu pour l'irrigation. Mieux vaudrait évidemment appliquer cette somme à la solution définitive et rationnelle et la hâter d'autant. Les travaux pour l'utilisation de la moitié des eaux des collecteurs vont s'exécuter en 1874 et en 1875; l'infection sera déjà considérablement diminuée. La commission a pensé qu'il convenait d'encourager la ville de Paris à poursuivre énergiquement l'œuvre de l'assainissement par la culture, plutôt que de l'entraîner dans des solutions bâtardes et coûteuses, dont l'urgence sera évidemment diminuée par le progrès incessant et plus que probable par l'irrigation.

A la rigueur, à l'extrémité ou à l'origine des artères maîtresses de distribution, l'épuration chimique pourrait être pratiquée lorsque les intempéries de la saison ou les nécessités de la culture laisseraient sans emploi une fraction des eaux élevées par les machines. Mais cette application restera toujours essentiellement intermittente et restreinte.

Extension de l'opération aux terrains domaniaux de la forêt de Saint-Germain

La commission a accueilli avec plus de faveur l'idée émise par un de ses membres. Il a été fait observer qu'il existait dans la forêt de Saint-Germain, entre Maisons-Laffite et Saint-Germain, 1,000 à 1,200 hectares de terrains domaniaux de faible valeur. Ces terrains sont situés entre la Seine et la cote 30, qui est aussi celle de la plaine de Gennevilliers à son origine; ils présentent d'excellentes conditions pour l'absorption et l'utilisation des eaux d'égout; celles-ci pourraient y être amenées, grâce à des travaux qui semblent n'offrir aucune difficulté transcendante. L'État et la ville de Paris pourraient passer une convention qui réglerait les droits respectifs et assurerait une répartition équitable du bénéfice qui résulterait évidemment de l'opération.

La seconde moitié des eaux des collecteurs, dont la première serait toujours destinée à la plaine de Gennevilliers, trouverait là un champ d'application absolument libre et immédiatement utilisable. L'opération de Gennevilliers serait du même coup facilitée; sentant que la ville de Paris pourrait se passer d'eux et refuser les eaux qu'elle leur offre libéralement aujourd'hui, les cultivateurs viendraient sans aucun doute solliciter comme une faveur et payer comme telle l'irrigation qu'ils acceptent trop souvent aujourd'hui d'assez mauvaise grâce, au moins en apparence.

La commission a été frappée de ces considérations, et elle pense qu'il y a lieu de recommander l'étude de la question à l'attention immédiate des ingénieurs de la ville de Paris. Si les études précises démontrent la possibilité pratique de l'opération, il y aurait évidemment lieu d'en tenir compte pour hâter l'assainissement complet du fleuve.

Réserve pour l'intervention de l'État, au cas d'arrêt dans les travaux exécutés par la ville de Paris

La commission insiste en effet tout particulièrement sur l'urgence d'une solution complète. Si, par suite des considérations exposées plus haut et des engagements pris devant elle par les représentants de la ville de Paris, la commission est unanime pour con-

venir qu'il est juste d'accorder un délai moral à l'administration municipale pour mener son œuvre à bonne fin, elle est également unanime pour maintenir énergiquement le principe de l'assainissement obligatoire de la Seine. Le gouvernement constatera les efforts faits par la ville de Paris dans ce sens et tiendra compte des difficultés et des frais considérables de l'opération; mais, au cas, improbable du reste, où les travaux se ralentiraient faute d'allocation de fonds suffisants, l'État conserverait évidemment le droit d'intervenir pour exiger l'achèvement des ouvrages nécessaires à l'assainissement complet du fleuve.

Procédés destinés à faire disparaître les causes secondaires d'altération de la Seine

Il ne reste à la commission qu'à traiter une question qu'elle a déjà signalée dans la première partie de son rapport et dont l'examen sera rendu facile par les développements dans lesquels elle vient d'entrer : il s'agit des eaux industrielles, eaux vannes de vidanges, de teinturerie, d'usines diverses, etc., ainsi que des eaux des égouts riverains de la Seine, non encore réunis aux collecteurs.

Voirie de Bondy. — Disparition de la Seine des eaux vannes de vidange

Parmi ces eaux impures, les plus importantes sont sans contredit celles qui sortent de la voirie de Bondy et qui causent actuellement l'infection spéciale du collecteur départemental qui débouche en Seine, à Saint-Denis. On sait qu'il existe à Paris, route d'Allemagne, un dépotoir municipal, ouvert à toutes les matières de vidange que les vidangeurs ne transportent pas à leurs voiries particulières; du dépotoir, les matières sont refoulées mécaniquement par une conduite dans la forêt de Bondy, où se trouve établie la voirie municipale. Jusqu'en 1870 cette voirie était exploitée, grâce à une série de baux amiables successifs, par la compagnie Richer, aujourd'hui Lesage et C^ie^. Dès cette époque les eaux vannes, après traitement à la voirie, descendaient en Seine par une conduite de retour et le collecteur départemental; l'exploitation, très-imparfaite, laissait ainsi retourner en Seine la moitié de l'azote des matières.

En 1872 par suite d'une adjudication publique, la voirie de Bondy fut dévolue à une compagnie anglaise qui, après avoir dévoré 5 millions de francs dans l'entreprise, a cessé toute exploitation. Les matières de vidange du dépotoir, au lieu d'être refoulées jusqu'à Bondy, sont directement renvoyées en Seine par la conduite de retour et causent l'infection profonde qu'on peut constater à Saint-Denis. La commission ne peut que protester énergiquement contre une pareille situation. Elle s'est demandé si un prompt remède n'était pas applicable : il ne lui appartenait pas, sans doute, de formuler un avis sur les procédés que la ville de Paris ou les industriels pouvaient mettre en œuvre pour effectuer la vidange dans les maisons ou traiter les matières dans les usines; ce sont des points dont le contrôle et la réglementation sont du domaine de la police municipale. Elle a cependant entendu avec intérêt les explications que lui a données à ce sujet l'un de ses membres, M. le directeur des eaux et égouts de la ville de Paris; elle appuie de ses vœux la substitution des tinettes-filtres ou des tuyaux de chute directe au système barbare des fosses; elle a appris avec satisfaction que dans ses usines actuelles la compagnie Lesage soumettait les matières à des opérations en vase clos, qui produisaient le sulfate d'ammoniaque ou la poudrette, sans donner lieu aux inconvénients signalés autrefois à Bondy.

Mais la commission rentrait dans son rôle en cherchant à éloigner de la Seine, soit les matières de vidanges, soit les eaux vannes sortant des usines où ces matières sont traitées. A ce point de vue, elle a trouvé dans l'emploi agricole de ces matières le même avantage qu'elle avait déjà reconnu pour les eaux d'égout. Il est inutile de revenir sur les principes antérieurement posés : la pratique est, du reste, déjà venu confirmer ici l'opinion de la commission. Jusqu'en 1872 un certain nombre de cultivateurs venaient prendre livraison à la voirie de Bondy d'une quantité de matières de vidanges, qui s'est

élevée à 16,000 mètres cubes en 1869; ils l'appliquaient avantageusement sur leurs terrains. Aujourd'hui la compagnie Lesage vient d'ajouter à son usine récente de Choisy-le-Roi une ferme de 136 hectares; sur cette ferme elle applique, par des procédés perfectionnés de culture, soit les matières à l'état naturel, soit les eaux vannes de l'usine. L'emploi de ces dernières, au cas où on pourrait les réunir aux eaux d'égout, se ferait dans des conditions encore plus simples et plus économiques. Or cette solution est facilement réalisable avec les dispositions que la ville de Paris a adoptées pour dériver les eaux du collecteur départemental. Ce collecteur passe, en effet, dans Paris, à une faible distance, soit du dépotoir, soit de la conduite de retour de Bondy. Il est par suite aisé d'y ramener les eaux vannes sorties de la voirie, quel que soit d'ailleurs le système qui sera adopté pour la reprise de l'exploitation de cette voirie. Ces eaux vannes suivront la dérivation de Saint-Ouen et arriveront par l'effet de la pesanteur seule jusque dans la plaine de Gennevilliers où elles seront distribuées en même temps que les eaux d'égout, dès que la canalisation projetée de ce côté sera exécutée. C'est là une opération qui ne saurait offrir de difficulté sérieuse, et la commission insiste tout particulièrement pour que les travaux nécessaires soient compris parmi ceux qui seront exécutés tout d'abord.

Établissements industriels et égouts secondaires

Quant aux établissements industriels divers et aux égouts secondaires qui déversent encore leurs eaux dans la Seine, la commission ne voit aucune raison pour ne pas leur appliquer les principes qui viennent d'être développés. Si une longue tolérance a laissé souvent tomber en désuétude les textes formels des règlements et en particulier les prescriptions de l'arrêt du conseil de 1777; si, en l'absence de procédés pratiques et simples d'épuration, l'administration a hésité à édicter des défenses qu'elle n'aurait guère su comment faire respecter, il semble que les faits acquis aujourd'hui, et spécialement la vaste expérience de Gennevilliers, permettent à l'heure actuelle une application plus sérieuse des règlements. Il va sans dire qu'une simple surveillance des rives de la Seine permet d'empêcher la projection directe de débris solides et de cadavres d'animaux. Dans un grand nombre de cas, la généralisation du système des collecteurs permettrait de supprimer les bouches secondaires qui se déversent encore en Seine; c'est ainsi que la ville de Paris a le projet de supprimer par deux collecteurs latéraux à la Seine les égouts de Grenelle, d'Auteuil, du quai d'Austerlitz, de Bercy et par des syphons ceux de la cité ou de l'île Saint-Louis. Il serait à désirer que des ouvrages analogues fussent établis dans la banlieue et vinssent intercepter les eaux impures avant leur déversement en Seine; les eaux pourraient alors subir un traitement analogue à celui qui a été indiqué ci-dessus pour les collecteurs de Paris.

Lorsque des établissements industriels se trouvent isolés et ne peuvent envoyer leurs eaux vannes dans une galerie publique voisine, rien ne les empêche d'appliquer les procédés suffisamment économiques auxquels conduit la science moderne et spécialement le système agricole d'assainissement; dans le département du Nord, cette solution est déjà pratiquée dans un certain nombre de cas; elle était préconisée en 1859, ainsi que le drainage dans le cas de sols imperméables, par M. Wurtz, dans un remarquable rapport sur les résidus de distillerie. M. Dailly traite ainsi depuis longtemps les résidus de sa distillerie, à Trappes; M. Gérardin a fait également intervenir l'action du sol drainé pour épurer des résidus de féculerie et autres établissements industriels a Gonesse, Aubervilliers, Choisy. Les commissaires officiels de l'enquête anglaise sur la pollution des rivières sont arrivés de leur côté à la même conclusion.

Partout l'action combinée du sol et de la végétation se présente comme la solution complète et rationnelle de l'assainissement des rivières.

Par un pareil procédé, les substances qui portaient atteinte à la salubrité publique se trouvent transformées en source de richesse agricole; non-seulement le mal disparaît, mais il devient un bien. L'hygiène est sauvegardée, l'agriculture profite et la grande loi naturelle de la restitution est satisfaite.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

En résumé, les considérations et observations consignées dans le présent rapport ont conduit la commission à adopter les conclusions suivantes.

En ce qui concerne l'état actuel des eaux de la Seine :

1° La seule inspection de l'état apparent de la rivière conduit aux résultats suivants :

En amont de Paris, les eaux de la rivière sont dans un état général de pureté satisfaisant.

Dans la traversée de la capitale, et en aval jusqu'à Clichy, l'altération générale des eaux par les déjections provenant d'usines ou d'égouts est pour l'instant peu sensible. Mais à partir de l'égout collecteur qui débouche dans la Seine, à Clichy, les eaux qui longent la rive droite passent brusquement à un état d'infection repoussant, et cet état est considérablement aggravé à partir de Saint-Denis jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, par les eaux fétides que déverse le collecteur départemental chargé des eaux vannes de la voirie de Bondy, et des usines d'Aubervilliers et Saint-Denis.

Cette pollution des eaux par les déjections des égouts collecteurs, très-marquée dans le bras droit dans les limites qui viennent d'être indiquées, s'étend aussi, mais à un degré relativement faible, au bras gauche.

A partir d'Argenteuil, l'altération des eaux décroît assez rapidement. Elle est encore sensible à la hauteur de Marly, et ne disparaît complétement qu'en aval de Meulan.

Il existe au fond de la rivière, à partir de la bouche des égouts collecteurs, des dépôts de matières infectes en fermentation qui dégagent incessamment des bulles de gaz d'hydrogène carboné et d'hydrogène sulfuré. Ces bulles, généralement très-petites, prennent souvent pendant l'été un volume considérable pouvant atteindre environ un mètre de diamètre.

Les draguages exécutés par le service de la navigation pour l'enlèvement de ces dépôts, dans la saison où ils peuvent être pratiqués sans devenir eux-mêmes une cause d'insalubrité, sont insuffisants pour faire face à l'enlèvement de ces dépôts, dont le volume s'accroît annuellement.

2° Indépendamment du trouble apparent des eaux, leur altération a pu être caractérisée, d'une part, par la proportion des matières fermentescibles qui y sont en suspension ou en dissolution, et, d'autre part, par la proportion d'oxygène libre qu'elles tiennent en dissolution.

D'après les expériences mentionnées dans ce rapport, on doit considérer que, depuis le débouché de l'égout collecteur de Clichy jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, les eaux du bras droit ne peuvent servir ni à l'alimentation des hommes et des animaux, ni à la cuisson des aliments, ni à d'autres usages domestiques, et qu'elles seraient même impropres au lavage des voies publiques, sans une décantation ou une épuration préalable.

Depuis Argenteuil jusqu'à Marly et au delà, l'eau devient moins impure; elle est susceptible de se prêter à une grande partie des usages courants auxquels peuvent la consacrer les riverains; sans être impropre à l'alimentation, elle a encore une aération insuffisante et elle est chargée d'une assez forte proportion de substances minérales azotées.

En aval de Meulan et de Mantes, les eaux de la Seine, dépouillées des troubles provenant des égouts de Paris et régénérées par l'action de l'oxygène de l'atmosphère, redeviennent propres à l'alimentation et aux usages domestiques.

En ce qui concerne les mesures à prendre :

1° D'une manière générale, il y a lieu d'interdire en principe, par application de l'ordonnance du roi du 20 février 1773 et de l'arrêt du conseil du 27 juin 1777, de jeter

dans la Seine des eaux ou des immondices et déjections quelconques qui sont de nature à rendre ses eaux insalubres et impropres aux usages domestiques.

2° Pour remédier à l'infection de la Seine par les eaux des collecteurs de Paris, le moyen le plus efficace, le plus économique et le plus pratique consiste dans le déversement de ces eaux par irrigations sur un sol suffisamment perméable ; des cultures très-diverses, surtout les cultures maraîchères, trouvent dans ces eaux l'humidité et l'engrais qui leur sont nécessaires.

Les expériences faites dans la plaine de Gennevilliers sont entièrement concluantes pour démontrer non-seulement la puissante végétation produite par les arrosages, mais encore leur innocuité sous le rapport de la salubrité, ainsi que la parfaite épuration des eaux qui arrivent à la rivière après avoir traversé un sous-sol naturellement perméable ou convenablement drainé. Il est d'ailleurs prouvé que les matières en suspension sont retenues dans la couche supérieure du sol cultivé ; tout porte à croire que les matières organiques azotées sont absorbées par la végétation, ou oxydées par le sous-sol, qui conserve indéfiniment sa perméabilité.

3° La commission estime que la totalité des eaux d'égout de la ville de Paris, dont le volume, après la mise en service de la dérivation de la Vanne, sera porté à environ 100 millions de mètres cubes par an, pourra être employée sur la surface d'environ 2,000 hectares qui est propre à cet usage dans la presqu'île de Gennevilliers.

Toutefois il peut être utile et convenable de porter une partie des eaux d'égout sur d'autres terrains, et pour cette éventualité la partie de la forêt domaniale de Saint-Germain qui est voisine de la Seine semble devoir offrir un emplacement convenable. L'étude de cette question paraît devoir être recommandée dès ce moment aux ingénieurs de la ville de Paris.

En tout cas il importe de mettre promptement à exécution le projet qui est soumis au conseil municipal de Paris pour l'emploi d'un volume d'eau de 50 millions de mètres cubes par an sur une surface d'environ 1,000 hectares sur le territoire de la commune de Gennevilliers.

4° Par l'emploi prochain d'au moins la moitié des eaux d'égout dans la plaine de Gennevilliers au moyen des travaux qui vont être entrepris, l'état de la Seine éprouvera une amélioration sensible, mais qui sera loin d'être suffisante. Pour l'assainissement complet de la rivière, il faut que les eaux d'égout en soient détournées en totalité, et il importe que la ville de Paris hâte le plus possible l'exécution des travaux complémentaires.

5° Quant à l'épuration par les procédés chimiques, et en particulier par le sulfate d'alumine, la commission est d'avis qu'elle ne saurait constituer une solution complète et pratique de la question ; l'application de ces procédés à la totalité des eaux d'égout entraînerait à des dépenses et à des difficultés d'exploitation qui ne sont aucunement en rapport avec les résultats obtenus soit au point de vue de la salubrité, soit au point de vue agricole ; l'épuration chimique ne saurait être appliquée que temporairement et sur une échelle restreinte, comme expédient complémentaire, dans quelques cas particuliers.

6° Les draguages pour l'enlèvement au fond de la rivière des dépôts formés par les déjections des égouts doivent être continués avec toute l'activité que comportent les précautions commandées par la salubrité.

7° Les eaux provenant de la voirie de Bondy étant la principale cause d'infection de l'égout départemental qui débouche en Seine à Saint-Denis, il est urgent que cet établissement reçoive une transformation qui mette fin aux graves inconvénients qu'il présente. Mais dès aujourd'hui les eaux qui en découlent peuvent, sans grande dépense, et par la seule action de la gravité, être amenées dans la plaine de Gennevilliers ; les travaux nécessaires à cet effet doivent être compris parmi ceux à exécuter immédiatement.

8° Bien que les eaux provenant, soit des usines et bateaux à lessive, soit des égouts secondaires, débouchent encore en Seine et contribuent quant à présent, à un degré se-

condaire, à l'altération des eaux de la Seine, elles sont souvent très-infectes, et leur écoulement dans la rivière n'est pas sans avoir des inconvénients réels. La commission appelle l'attention de l'administration sur une exécution plus efficace des règlements qui prescrivent l'épuration préalable de ces eaux, épuration rendue aujourd'hui possible par des procédés suffisamment économiques, et spécialement par le système rationnel de l'emploi agricole. Il importe également de faire mieux observer les règlements qui interdisent de jeter des corps morts ou des immondices quelconques dans les cours d'eau.

Paris, le 12 décembre 1874.

APPENDICE

Nous avons réuni dans cet Appendice les tables les plus utiles pour les distributions d'eau et de nombreux exemples qui indiquent nettement la marche à suivre pour l'emploi, soit de ces tables, soit des formules établies au chapitre premier.

TABLE I

La table I donne les vitesses en fonction des hauteurs de chute, vitesses calculées par la formule

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Cette table se trouve déjà dans notre première partie du *Traité des eaux*, mais elle est d'un usage si fréquent que nous avons cru devoir la reproduire ici. — L'usage s'en comprend à première vue; c'est une table à simple entrée, dans laquelle les vitesses sont placées en regard des hauteurs de chute correspondantes :

TABLE DE LA VITESSE v DUE A UNE HAUTEUR DE CHUTE h.

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
0,001	0,140	0,45	2,971	0,98	4,384	1,51	5,443	2,04	6,326
0,002	0,198	0,46	3,004	0,99	4,407	1,52	5,461	2,05	6,341
0,003	0,243	0,47	3,037	1,00	4,429	1,53	5,479	2,06	6,357
0,004	0,280	0,48	3,069	1,01	4,451	1,54	5,496	2,07	6,372
0,005	0,313	0,49	3,100	1,02	4,473	1,55	5,514	2,08	6,388
0,006	0,343	0,50	3,132	1,03	4,495	1,56	5,532	2,09	6,403
0,007	0,370	0,51	3,163	1,04	4,517	1,57	5,550	2,10	6,418
0,008	0,395	0,52	3,194	1,05	4,539	1,58	5,567	2,11	6,434
0,009	0,420	0,53	3,224	1,06	4,560	1,59	5,585	2,12	6,449
0,01	0,443	0,54	3,253	1,07	4,582	1,60	5,603	2,13	6,464
0,02	0,626	0,55	3,285	1,08	4,603	1,61	5,620	2,14	6,479
0,03	0,767	0,56	3,314	1,09	4,624	1,62	5,637	2,15	6,494
0,04	0,886	0,57	3,344	1,10	4,645	1,63	5,655	2,16	6,510
0,05	0,990	0,58	3,373	1,11	4,666	1,64	5,672	2,17	6,525
0,06	1,085	0,59	3,402	1,12	4,687	1,65	5,690	2,18	6,540
0,07	1,172	0,60	3,431	1,13	4,708	1,66	5,707	2,19	6,555
0,08	1,253	0,61	3,459	1,14	4,729	1,67	5,724	2,20	6,570
0,09	1,329	0,62	3,488	1,15	4,750	1,68	5,741	2,21	6,584
0,10	1,401	0,63	3,516	1,16	4,770	1,69	5,758	2,22	6,599
0,11	1,468	0,64	3,543	1,17	4,790	1,70	5,775	2,23	6,614
0,12	1,534	0,65	3,571	1,18	4,811	1,71	5,792	2,24	6,629
0,13	1,597	0,66	3,598	1,19	4,831	1,72	5,809	2,25	6,644
0,14	1,657	0,67	3,625	1,20	4,852	1,73	5,826	2,26	6,658
0,15	1,715	0,68	3,652	1,21	4,872	1,74	5,842	2,27	6,673
0,16	1,772	0,69	3,679	1,22	4,892	1,75	5,859	2,28	6,688
0,17	1,826	0,70	3,706	1,23	4,913	1,76	5,876	2,29	6,703
0,18	1,879	0,71	3,732	1,24	4,933	1,77	5,893	2,30	6,717
0,19	1,931	0,72	3,758	1,25	4,953	1,78	5,909	2,31	6,732
0,20	1,981	0,73	3,784	1,26	4,972	1,79	5,926	2,32	6,746
0,21	2,030	0,74	3,810	1,27	4,991	1,80	5,942	2,33	6,761
0,22	2,078	0,75	3,836	1,28	5,011	1,81	5,959	2,34	6,775
0,23	2,124	0,76	3,861	1,29	5,031	1,82	5,975	2,35	6,790
0,24	2,170	0,77	3,886	1,30	5,050	1,83	5,992	2,36	6,804
0,25	2,215	0,78	3,911	1,31	5,069	1,84	6,008	2,37	6,819
0,26	2,259	0,79	3,936	1,32	5,089	1,85	6,024	2,38	6,833
0,27	2,301	0,80	3,961	1,33	5,108	1,86	6,041	2,39	6,847
0,28	2,344	0,81	3,986	1,34	5,127	1,87	6,057	2,40	6,862
0,29	2,385	0,82	4,011	1,35	5,146	1,88	6,073	2,41	6,876
0,30	2,426	0,83	4,035	1,36	5,165	1,89	6,089	2,42	6,890
0,31	2,466	0,84	4,059	1,37	5,184	1,90	6,105	2,43	6,904
0,32	2,506	0,85	4,083	1,38	5,203	1,91	6,122	2,44	6,919
0,33	2,544	0,86	4,107	1,39	5,222	1,92	6,138	2,45	6,933
0,34	2,582	0,87	4,131	1,40	5,241	1,93	6,154	2,46	6,947
0,35	2,620	0,88	4,155	1,41	5,259	1,94	6,170	2,47	6,961
0,36	2,658	0,89	4,178	1,42	5,278	1,95	6,186	2,48	6,975
0,37	2,694	0,90	4,202	1,43	5,297	1,96	6,202	2,49	6,989
0,38	2,730	0,91	4,225	1,44	5,315	1,97	6,217	2,50	7,003
0,39	2,766	0,92	4,248	1,45	5,333	1,98	6,232	2,51	7,017
0,40	2,801	0,93	4,271	1,46	5,351	1,99	6,248	2,52	7,031
0,41	2,836	0,94	4,294	1,47	5,370	2,00	6,264	2,53	7,045
0,42	2,870	0,95	4,317	1,48	5,388	2,01	6,279	2,54	7,059
0,43	2,904	0,96	4,340	1,49	5,406	2,02	6,295	2,55	7,073
0,44	2,938	0,97	4,362	1,50	5,425	2,03	6,311	2,56	7,087

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
2,57	7,101	3,14	7,849	3,71	8,531	4,28	9,163	4,85	9,754
2,58	7,114	3,15	7,861	3,72	8,543	4,29	9,174	4,86	9,764
2,59	7,128	3,16	7,873	3,73	8,554	4,30	9,185	4,87	9,774
2,60	7,142	3,17	7,886	3,74	8,566	4,31	9,195	4,88	9,784
2,61	7,156	3,18	7,898	3,75	8,577	4,32	9,206	4,89	9,794
2,62	7,169	3,19	7,911	3,76	8,588	4,33	9,217	4,90	9,804
2,63	7,183	3,20	7,923	3,77	8,600	4,34	9,227	4,91	9,814
2,64	7,197	3,21	7,936	3,78	8,611	4,35	9,238	4,92	9,824
2,65	7,210	3,22	7,948	3,79	8,623	4,36	9,248	4,93	9,834
2,66	7,224	3,23	7,960	3,80	8,634	4,37	9,259	4,94	9,844
2,67	7,237	3,24	7,973	3,81	8,645	4,38	9,270	4,95	9,854
2,68	7,251	3,25	7,985	3,82	8,657	4,39	9,280	4,96	9,864
2,69	7,265	3,26	7,997	3,83	8,668	4,40	9,291	4,97	9,874
2,70	7,278	3,27	8,009	3,84	8,679	4,41	9,301	4,98	9,884
2,71	7,291	3,28	8,022	3,85	8,691	4,42	9,312	4,99	9,894
2,72	7,305	3,29	8,034	3,86	8,702	4,43	9,322	5,00	9,904
2,73	7,318	3,30	8,046	3,87	8,713	4,44	9,333	5,25	10,149
2,74	7,332	3,31	8,058	3,88	8,725	4,45	9,343	5,50	10,387
2,75	7,345	3,32	8,070	3,89	8,736	4,46	9,354	5,75	10,621
2,76	7,358	3,33	8,082	3,90	8,747	4,47	9,364	6,00	10,849
2,77	7,372	3,34	8,095	3,91	8,758	4,48	9,375	6,25	11,073
2,78	7,385	3,35	8,107	3,92	8,769	4,49	9,385	6,50	11,292
2,79	7,398	3,36	8,119	3,93	8,780	4,50	9,396	6,75	11,507
2,80	7,411	3,37	8,131	3,94	8,792	4,51	9,406	7,00	11,718
2,81	7,425	3,38	8,143	3,95	8,803	4,52	9,417	7,25	11,926
2,82	7,437	3,39	8,155	3,96	8,814	4,53	9,427	7,50	12,130
2,83	7,451	3,40	8,167	3,97	8,825	4,54	9,437	7,75	12,330
2,84	7,464	3,41	8,179	3,98	8,836	4,55	9,448	8,00	12,528
2,85	7,477	3,42	8,191	3,99	8,847	4,56	9,458	8,25	12,722
2,86	7,490	3,43	8,203	4,00	8,858	4,57	9,468	8,50	12,913
2,87	7,503	3,44	8,215	4,01	8,869	4,58	9,479	8,75	13,102
2,88	7,517	3,45	8,227	4,02	8,880	4,59	9,489	9,00	13,288
2,89	7,530	3,46	8,239	4,03	8,892	4,60	9,500	9,25	13,471
2,90	7,543	3,47	8,251	4,04	8,903	4,61	9,510	9,50	13,652
2,91	7,556	3,48	8,263	4,05	8,914	4,62	9,520	9,75	13,830
2,92	7,569	3,49	8,274	4,06	8,925	4,63	9,530	10,00	14,006
2,93	7,582	3,50	8,286	4,07	8,936	4,64	9,541	11,00	14,690
2,94	7,594	3,51	8,298	4,08	8,946	4,65	9,551	12,00	15,343
2,95	7,607	3,52	8,310	4,09	8,957	4,66	9,561	13,00	15,970
2,96	7,620	3,53	8,322	4,10	8,968	4,67	9,572	14,00	16,572
2,97	7,633	3,54	8,333	4,11	8,979	4,68	9,582	15,00	17,154
2,98	7,646	3,55	8,345	4,12	8,990	4,69	9,592	16,00	17,717
2,99	7,659	3,56	8,357	4,13	9,001	4,70	9,602	17,00	18,257
3,00	7,672	3,57	8,369	4,14	9,012	4,71	9,612	18,00	18,791
3,01	7,684	3,58	8,380	4,15	9,023	4,72	9,623	19,00	19,306
3,02	7,697	3,59	8,392	4,16	9,034	4,73	9,633	20,00	19,808
3,03	7,710	3,60	8,404	4,17	9,045	4,74	9,643	21,00	20,297
3,04	7,722	3,61	8,415	4,18	9,055	4,75	9,653	22,00	20,775
3,05	7,735	3,62	8,427	4,19	9,066	4,76	9,663	23,00	21,242
3,06	7,748	3,63	8,439	4,20	9,077	4,77	9,673	24,00	21,698
3,07	7,760	3,64	8,450	4,21	9,088	4,78	9,684	25,00	22,146
3,08	7,773	3,65	8,462	4,22	9,099	4,79	9,694	26,00	22,584
3,09	7,786	3,66	8,474	4,23	9,109	4,80	9,704	27,00	23,015
3,10	7,798	3,67	8,485	4,24	9,120	4,81	9,714	28,00	23,437
3,11	7,811	3,68	8,497	4,25	9,131	4,82	9,724	29,00	23,852
3,12	7,823	3,69	8,508	4,26	9,142	4,83	9,734	30,00	24,260
3,13	7,836	3,70	8,520	4,27	9,152	4,84	9,744	31,00	24,661

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
32	25,055	54	32,548	76	38,613	98	43,847	200	62,638
33	25,444	55	32,848	77	38,866	99	44,070	205	63,416
34	25,826	56	33,145	78	39,117	100	44,292	210	64,185
35	26,203	57	33,440	79	39,367	105	45,386	215	64,944
36	26,575	58	33,732	80	39,616	110	46,454	220	65,695
37	26,942	59	34,021	81	39,863	115	47,498	225	66,438
38	27,303	60	34,308	82	40,108	120	48,519	230	67,171
39	27,660	61	34,593	83	40,352	125	49,520	235	67,898
40	28,013	62	34,875	84	40,594	130	50,500	240	68,616
41	28,361	63	35,155	85	40,835	135	51,462	245	69,328
42	28,704	64	35,433	86	41,074	140	52,407	250	70,031
43	29,044	65	35,709	87	41,313	145	53,334	255	70,728
44	29,380	66	35,983	88	41,549	150	54,246	260	71,418
45	29,712	67	36,254	89	41,785	155	55,143	265	72,102
46	30,040	68	36,524	90	42,019	160	56,025	270	72,780
47	30,365	69	36,791	91	42,252	165	56,894	275	73,450
48	30,686	70	37,057	92	42,483	170	57,749	280	74,114
49	31,004	71	37,321	93	42,713	175	58,592	285	74,773
50	31,329	72	37,583	94	42,942	180	59,424	290	75,426
51	31,631	73	37,843	95	43,170	185	60,243	295	76,074
52	31,939	74	38,101	96	43,397	190	61,052	300	76,716
53	32,245	75	38,358	97	43,622	195	61,850		

TABLE II

La table II donne diverses fonctions du rayon et le coefficient de résistance b_1 dans les tuyaux dont le rayon varie de $0^m,01$ à $0^m,75$.

Les fonctions du rayon sont la racine carrée, la cinquième puissance, la racine carrée de la cinquième puissance, l'inverse du rayon et l'inverse de sa cinquième puissance. Toutes ces fonctions se rencontrent dans les diverses formules relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux; toutes les fois qu'on aura à se servir d'une de ces formules, la présente table facilitera singulièrement le calcul.

Elle donne encore : 1° la section du tuyau exprimée en mètres carrés ; 2° la valeur du coefficient b_1. Cette valeur s'applique à des tuyaux depuis longtemps en usage ; c'est le seul cas que l'on doive considérer dans la pratique. La valeur de b_1 est donc le double de celle inscrite aux tables de Darcy, puisque la résistance est moitié moindre dans les tuyaux neufs que dans les tuyaux depuis longtemps en usage.

TABLE DE DIVERSES FONCTIONS DU RAYON

ET DE LA VALEUR DU COEFFICIENT b_1 POUR DES TUYAUX DEPUIS LONGTEMPS EN SERVICE

(Ce coefficient est double de celui qui est relatif aux tuyaux neufs.)

RAYONS	RACINE CARRÉE DU RAYON $\sqrt{r}$	CARRÉ DU RAYON r^2	CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON r^5	RACINE CARRÉE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\sqrt{r^5}$	INVERSE $\frac{1}{r}$ DU RAYON	INVERSE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE $\frac{1}{r^5}$ DU RAYON	SECTION DU TUYAU (MÈTRES CARRÉS)	VALEURS DU COEFFICIENT b_1
mètres								
0,01	0,100	0,0001	0,0000000001	0,000010	100,00	10000000000	0,000314	0,002308
0,02	0,141	0,0004	0,0000000003	0,000057	50,00	312500000	0,00126	0,001660
0,027	0,167	0,0007	0,0000000014	0,000120	37,03	70388636	0,00143	0,001492
0,03	0,173	0,0009	0,0000000024	0,000155	33,33	41152270	0,00283	0,001444
0,04	0,200	0,0016	0,0000000102	0,000320	25,00	9765625	0,00503	0,001332
0,05	0,224	0,0025	0,0000000312	0,000559	20,00	3200000	0,00785	0,001272
0,054	0,232	0,0029	0,0000000459	0,000678	18,52	2177866	0,00916	0,001252
0,06	0,245	0,0036	0,0000000778	0,000882	16,67	1286009	0,0113	0,001228
0,07	0,265	0,0049	0,0000001681	0,001296	14,29	594990	0,0154	0,001196
0,08	0,283	0,0064	0,0000003277	0,001810	12,50	305175	0,0201	0,001172
0,081	0,285	0,0066	0,0000003486	0,001867	12,35	284015	0,0206	0,001172
0,09	0,300	0,0081	0,0000005901	0,002430	11,11	169351	0,0264	0,001156
0,10	0,316	0,0100	0,0000010000	0,003162	10,00	100000	0,0314	0,001142
0,108	0,329	0,0117	0,0000014683	0,003832	9,26	68105	0,0366	0,001132
0,11	0,332	0,0121	0,0000016105	0,004013	9,09	62092	0,0380	0,001130
0,12	0,346	0,0144	0,0000024883	0,004988	8,33	40187	0,0452	0,001121
0,13	0,361	0,0169	0,0000037129	0,006093	7,69	26932	0,0531	0,001112
0,135	0,367	0,0182	0,0000044816	0,006694	7,41	22313	0,0573	0,001108
0,14	0,374	0,0196	0,0000053782	0,007334	7,14	18593	0,0616	0,001104
0,15	0,387	0,0225	0,0000075937	0,008714	6,67	13168	0,0707	0,001100
0,16	0,400	0,0256	0,0000104857	0,010240	6,25	9536	0,0804	0,001100
0,162	0,402	0,0262	0,0000111545	0,010561	6,17	8965	0,0850	0,001100
0,17	0,412	0,0289	0,0000141985	0,011916	5,88	7042	0,0908	0,001090
0,18	0,424	0,0324	0,0000188956	0,013746	5,55	5292	0,1018	0,001084
0,19	0,436	0,0361	0,0000266610	0,015755	5,26	3750	0,1134	0,001082
0,20	0,447	0,0400	0,0000320000	0,017888	5,00	3125	0,1257	0,001078
0,21	0,458	0,0441	0,0000408410	0,020209	4,76	2448	0,1385	0,001074
0,216	0,463	0,0467	0,0000460360	0,021587	4,63	2171	0,145	0,001072

RAYONS	RACINE CARRÉE DU RAYON $\sqrt{r}$	CARRÉ DU RAYON r^2	CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON r^5	RACINE CARRÉE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\sqrt{r^5}$	INVERSE DU RAYON $\frac{1}{r}$	INVERSE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\frac{1}{r^5}$	SECTION DU TUYAU (MÈTRES CARRÉS)	VALEURS DU COEFFICIENT b_1
mètres.								
0,22	0,469	0,0484	0,000515565	0,022702	4,55	1940	0,152	0,001072
0,23	0,480	0,0529	0,000645634	0,025370	4,35	1555	0,166	0,001070
0,24	0,490	0,0576	0,000796	0,0282	4,17	1235	0,181	0,001066
0,25	0,500	0,0625	0,000977	0,0312	4,00	1024	0,196	0,001064
0,26	0,510	0,0676	0,001188	0,0345	3,85	841	0,212	0,001063
0,27	0,520	0,0729	0,001435	0,0379	3,70	697	0,229	0,001062
0,28	0,529	0,0784	0,001721	0,0415	3,57	581	0,246	0,001060
0,29	0,538	0,0841	0,002051	0,0453	3,45	487	0,264	0,001058
0,30	0,547	0,0900	0,002410	0,0495	3,33	418	0,283	0,001056
0,31	0,556	0,0961	0,002865	0,0535	3,23	349	0,302	0,001054
0,32	0,565	0,102	0,003355	0,0579	3,13	298	0,322	0,001052
0,325	0,570	0,106	0,003626	0,0602	3,07	276	0,332	0,001052
0,33	0,574	0,109	0,003914	0,0626	3,03	256	0,342	0,001051
0,34	0,583	0,116	0,004544	0,0675	2,94	220	0,363	0,001050
0,35	0,592	0,122	0,005252	0,0725	2,86	190	0,385	0,001050
0,36	0,600	0,130	0,006047	0,0778	2,78	165	0,407	0,001049
0,37	0,608	0,137	0,006934	0,0833	2,70	144	0,430	0,001048
0,38	0,616	0,144	0,007924	0,0890	2,63	126	0,454	0,001047
0,39	0,624	0,152	0,009022	0,0950	2,57	111	0,478	0,001047
0,40	0,632	0,160	0,010240	0,101	2,50	98	0,503	0,001046
0,41	0,640	0,168	0,011586	0,108	2,44	86	0,528	0,001045
0,42	0,648	0,176	0,013069	0,114	2,38	77	0,554	0,001044
0,43	0,656	0,185	0,014701	0,121	2,33	68	0,581	0,001044
0,44	0,663	0,194	0,016492	0,128	2,27	60,64	0,608	0,001043
0,45	0,670	0,202	0,018453	0,136	2,22	54,19	0,636	0,001042
0,46	0,678	0,212	0,020596	0,144	2,17	48,55	0,665	0,001041
0,47	0,686	0,221	0,022935	0,151	2,13	43,60	0,694	0,001040
0,48	0,693	0,230	0,025480	0,160	2,08	39,25	0,724	0,001040
0,49	0,700	0,240	0,028248	0,168	2,04	35,40	0,754	0,001039
0,50	0,707	0,250	0,031250	0,177	2,00	32,00	0,785	0,001038
0,55	0,742	0,302	0,0503	0,224	1,82	19,87	0,950	0,001034
0,60	0,775	0,360	0,0778	0,279	1,66	12,86	1,13	0,001030
0,75	0,866	0,563	0,237	0,487	1,33	4,21	1,77	0,001

TABLE III

Table donnant les charges, les vitesses et les débits correspondants pour des tuyaux d'un diamètre variant entre $0^m,01$ et $1^m,50$, ces tuyaux étant depuis longtemps en service.

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE									
	Diamètre $0^m,01$ Surface $0^{mq},000079$		Diamètre $0^m,02$ Surface $0^{mq},000314$		Diamètre $0^m,027$ Surface $0^{mq},000573$		Diamètre $0^m,03$ Surface $0^{mq},000707$		Diamètre $0^m,04$ Surface $0^{mq},00126$	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,112	0,00000093	0,021	0,0000066	0,026	0,0000149	0,028	0,0000198	0,054	0,000045
0,0002	0,013	0,00000103	00029	0,0000091	0,036	0,0000206	0,039	0,0000276	0,048	0,000060
0,0005	0,019	0,0000015	0,035	0,0000110	0,044	0,0000252	0,048	0,0000339	0,058	0,000075
0,0004	0,025	0,0000018	0,041	0,0000129	0,052	0,0000298	0,056	0,0000396	0,069	0,000087
0,0005	0,026	0,0000021	0,045	0,0000141	0,057	0,0000307	0,062	0,0000438	0,073	0,000094
0,0006	0,027	0,0000021	0,049	0,0000154	0,062	0,0000355	0,067	0,0000474	0,082	0,000103
0,0007	0,029	0,0000023	0,054	0,0000169	0,067	0,0000384	0,073	0,0000516	0,089	0,000112
0,0008	0,033	0,0000026	0,058	0,0000182	0,072	0,0000413	0,078	0,0000551	0,096	0,000121
0,0009	0,035	0,0000028	0,062	0,0000195	0,078	0,0000447	0,084	0,0000594	0,103	0,000130
0,001	0,037	0,0000029	0,066	0,0000207	0,083	0,0000476	0,090	0,0000636	0,110	0,000139
0,002	0,053	0,0000042	0,093	0,0000292	0,117	0,0000670	0,126	0,0000891	0,154	0,000194
0,003	0,064	0,0000051	0,113	0,0000355	0,142	0,0000814	0,154	0,000109	0,189	0,000238
0,004	0,074	0,0000058	0,130	0,0000408	0,163	0,0000934	0,176	0,000124	0,216	0,000272
0,005	0,083	0,0000066	0,146	0,0000458	0,184	0,000105	0,199	0,000141	0,244	0,000307
0,006	0,090	0,0000071	0,155	0,0000487	0,199	0,000114	0,216	0,000153	0,264	0,000333
0,007	0,098	0,0000077	0,173	0,0000543	0,218	0,000125	0,235	0,000166	0,288	0,000363
0,008	0,104	0,0000082	0,185	0,0000581	0,231	0,000132	0,249	0,000176	0,305	0,000384
0,009	0,111	0,0000088	0,196	0,0000615	0,246	0,000141	0,266	0,000188	0,326	0,000411
0,01	0,117	0,0000092	0,206	0,0000647	0,259	0,000148	0,280	0,000198	0,343	0,000432
0,015	0,145	0,0000113	0,251	0,0000788	0,316	0,000181	0,342	0,000242	0,418	0,000527
0,02	0,165	0,0000130	0,290	0,0000911	0,365	0,000209	0,395	0,000279	0,484	0,000610
0,025	0,185	0,0000146	0,325	0,000102	0,409	0,000234	0,442	0,000312	0,542	0,000683
0,03	0,202	0,0000159	0,356	0,000112	0,448	0,000257	0,484	0,000342	0,593	0,000747
0,035	0,219	0,0000173	0,385	0,000121	0,484	0,000277	0,524	0,000370	0,641	0,000808
0,04	0,234	0,0000185	0,412	0,000129	0,518	0,000297	0,560	0,000396	0,686	0,000864
0,045	0,248	0,0000196	0,437	0,000137	0,549	0,000315	0,594	0,000420	0,727	0,000916
0,05	0,261	0,0000206	0,459	0,000144	0,578	0,000331	00624	0,000441	0,765	0,000964
0,06	0,287	0,0000226	0,505	0,000159	0,635	0,000364	0,686	0,000485	0,834	0,00105
0,07	0,310	0,0000245	0,546	0,000171	0,686	0,000393	0,742	0,000525	0,909	0,00115
0,08	0,331	0,0000261	0,583	0,000183	0,733	0,000420	0,792	0,000560	0,973	0,00123
0,09	0,351	0,0000277	0,618	0,000194	0,777	0,000445	0,840	0,000594	1,029	0,00130
0,10	0,370	0,0000292	0,651	0,000204	0,818	0,000469	0,885	0,000626	1,084	0,00137
0,12	0,405	0,0000320	0,713	0,000224	0,896	0,000513	0,969	0,000685	1,187	0,00150
0,15	0,453	0,0000358	0,797	0,000250	1,002	0,000574	1,084	0,000766	1,327	0,00167
0,20	0,523	0,0000413	0,921	0,000289	1,158	0,000664	1,252	0,001084	1,533	0,00193

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET							
	DIAMÈTRE 0m,05 SURFACE 0mq,00196		DIAMÈTRE 0m,054 SURFACE 0mq,00229		DIAMÈTRE 0m,06 SURFACE 0mq,00283		DIAMÈTRE 0m,07 SURFACE 0mq,00385	
	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT
0,0001	0,040	0,000078	0,042	0,000096	0,045	0,00013	0,050	0,00019
0,0002	0,056	0,00011	0,059	0,00014	0,063	0,00018	0,070	0,00027
0,0003	0,068	0,00013	0,072	0,00016	0,077	0,00022	0,085	0,00033
0,0004	0,080	0,00016	0,084	0,00019	0,090	0,00025	0,100	0,00038
0,0005	0,088	0,00017	0,093	0,00021	0,099	0,00028	0,110	0,00042
0,0006	0,096	0,00019	0,101	0,00023	0,108	0,00031	0,120	0,00046
0,0007	0,104	0,00020	0,109	0,00025	0,117	0,00033	0,129	0,00049
0,0008	0,112	0,00022	0,118	0,00027	0,126	0,00036	0,139	0,00053
0,0009	0,120	0,00024	0,126	0,00029	0,135	0,00038	0,149	0,00057
0,001	0,128	0,00025	0,135	0,00031	0,144	0,00041	0,159	0,00061
0,002	0,180	0,00035	0,189	0,00043	0,203	0,00057	0,224	0,00086
0,003	0,220	0,00043	0,232	0,00053	0,248	0,00070	0,274	0,00105
0,004	0,252	0,00049	0,265	0,00061	0,284	0,00080	0,314	0,00121
0,005	0,284	0,00056	0,299	0,00068	0,321	0,00091	0,354	0,00136
0,006	0,308	0,00060	0,324	0,00074	0,347	0,00098	0,383	0,00147
0,007	0,336	0,00066	0,354	0,00081	0,379	0,00107	0,418	0,00161
0,008	0,356	0,00070	0,375	0,00086	0,401	0,00113	0,443	0,00171
0,009	0,380	0,00074	0,400	0,00092	0,428	0,00121	0,473	0,00182
0,01	0,400	0,00078	0,421	0,00096	0,451	0,00128	0,498	0,00191
0,015	0,488	0,00096	0,514	0,00118	0,550	0,00156	0,598	0,00229
0,02	0,564	0,00111	0,594	0,00136	0,636	0,00180	0,702	0,00270
0,025	0,632	0,00124	0,665	0,00152	0,713	0,00202	0,787	0,00303
0,03	0,692	0,00136	0,728	0,00177	0,780	0,00221	0,862	0,00332
0,035	0,748	0,00147	0,787	0,00180	0,843	0,00239	0,921	0,00345
0,04	0,800	0,00157	0,842	0,00195	0,902	0,00255	0,996	0,00372
0,045	0,848	0,00166	0,893	0,00204	0,956	0,00271	1,056	0,00407
0,05	0,892	0,00175	0,939	0,00215	1,006	0,00285	1,111	0,00428
0,06	0,980	0,00192	1,031	0,00236	1,105	0,00313	1,220	0,00470
0,07	1,060	0,00208	1,116	0,00266	1,195	0,00338	1,321	0,00509
0,08	1,122	0,00220	1,191	0,00273	1,276	0,00361	1,409	0,00542
0,09	1,200	0,00235	1,265	0,00289	1,355	0,00382	1,494	0,00574
0,10	1,264	0,00248	1,330	0,00305	1,425	0,00403	1,574	0,00606
0,12	1,384	0,00271	1,457	0,00334	1,560	0,00442	1,725	0,00665
0,15	1,548	0,00303	1,629	0,00373	1,745	0,00494	1,927	0,00732
0,20	1,788	0,00350	1,882	0,00431	2,016	0,00571	2,226	0,00857

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

DIAMÈTRE 0m,081 SURFACE 0mq,00515		DIAMÈTRE 0m,09 SURFACE 0mq,00636		DIAMÈTRE 0m,10 SURFACE 0mq,00785		DIAMÈTRE 0m,108 SURFACE 0mq,00916		DIAMÈTRE 0m,12 SURFACE 0mq,0113	
VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT
0,055	0,00028	0,058	0,00037	0,062	0,00049	0,065	0,00059	0,068	0,00077
0,066	0,00034	0,082	0,00052	0,087	0,00068	0,090	0,00082	0,095	0,0011
0,095	0,00048	0,099	0,00063	0,105	0,00082	0,110	0,00101	0,116	0,0013
0,109	0,00056	0,116	0,00074	0,124	0,00097	0,129	0,00118	0,136	0,0015
0,120	0,00062	0,128	0,00081	0,136	0,00107	0,142	0,00130	0,150	0,0017
0,131	0,00067	0,140	0,00089	0,149	0,00117	0,155	0,00142	0,163	0,0018
0,142	0,00073	0,151	0,00096	0,161	0,00126	0,168	0,00154	0,175	0,0020
0,153	0,00079	0,163	0,00104	0,174	0,00137	0,181	0,00166	0,191	0,0022
0,164	0,00084	0,175	0,00111	0,186	0,00146	0,194	0,00178	0,204	0,0023
0,175	0,00090	0,186	0,00118	0,198	0,00155	0,207	0,00190	0,218	0,0025
0,246	0,00127	0,262	0,00167	0,279	0,00219	0,291	0,00267	0,306	0,0035
0,300	0,00154	0,320	0,00204	0,341	0,00268	0,355	0,00325	0,375	0,0042
0,345	0,00178	0,367	0,00233	0,391	0,00307	0,407	0,00373	0,429	0,0048
0,388	0,00200	0,413	0,00263	0,440	0,00345	0,459	0,00420	0,484	0,0055
0,420	0,00216	0,448	0,00285	0,477	0,00374	0,497	0,00455	0,524	0,0059
0,459	0,00236	0,489	0,00311	0,521	0,00409	0,543	0,00497	0,572	0,0065
0,486	0,00250	0,518	0,00329	0,552	0,00433	0,575	0,00527	0,606	0,0068
0,519	0,00267	0,553	0,00352	0,589	0,00462	0,614	0,00562	0,647	0,0073
0,546	0,00281	0,582	0,00370	0,620	0,00487	0,646	0,00592	0,681	0,0077
0,666	0,00343	0,710	0,00452	0,756	0,00593	0,788	0,00722	0,831	0,0094
0,770	0,00397	0,821	0,00522	0,874	0,00686	0,911	0,00834	0,960	0,0108
0,865	0,00444	0,920	0,00585	0,980	0,00769	1,021	0,00935	1,076	0,0122
0,945	0,00487	1,007	0,00640	1,073	0,00812	1,118	0,01024	1,178	0,0133
1,021	0,00526	1,088	0,00692	1,159	0,00910	1,208	0,01107	1,267	0,0143
1,092	0,00562	1,164	0,00740	1,240	0,00973	1,292	0,01183	1,362	0,0154
1,158	0,00596	1,244	0,00791	1,314	0,01031	1,370	0,01255	1,444	0,0163
1,218	0,00627	1,298	0,00826	1,383	0,01086	1,441	0,01320	1,519	0,0172
1,338	0,00689	1,426	0,00907	1,519	0,01192	1,583	0,01542	1,668	0,0188
1,447	0,00745	1,542	0,00981	1,603	0,01258	1,712	0,01568	1,805	0,0204
1,515	0,00780	1,647	0,01047	1,755	0,01378	1,828	0,01674	1,927	0,0218
1,658	0,00844	1,746	0,01110	1,860	0,01460	1,938	0,01775	2,043	0,0231
1,725	0,00888	1,839	0,01170	1,959	0,01538	2,041	0,01869	2,152	0,0243
1,889	0,00973	2,014	0,01281	2,145	0,01684	2,235	0,02047	2,356	0,0266
2,115	0,01188	2,252	0,01532	2,399	0,01883	2,500	0,02290	2,629	0,0297
2,441	0,01257	2,602	0,01655	2,771	0,02175	2,888	0,02645	3,044	0,0344

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET									
	Diamètre $0^m,135$ Section $0^{mq},0143$		Diamètre $0^m,15$- Section $0^{mq},0177$		Diamètre $0^m,162$ Section $0^{mq},0206$		Diamètre $0^m,18$ Section $0^{mq},0264$		Diamètre $0^m,19$ Section $0^{mq},0284$	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,074	0,00106	0,079	0,00140	0,082	0,00169	0,087	0,00250	0,089	0,00253
0,0002	0,104	0,00153	0,110	0,00195	0,115	0,00237	0,121	0,00319	0,124	0,00352
0,0003	0,126	0,00180	0,134	0,00237	0,140	0,00288	0,148	0,00391	0,151	0,00429
0,0004	0,148	0,00212	0,157	0,00278	0,164	0,00338	0,174	0,00459	0,178	0,00506
0,0005	0,163	0,00233	0,173	0,00306	0,180	0,00351	0,192	0,00507	0,196	0,00557
0,0006	0,178	0,00254	0,189	0,00334	0,197	0,00406	0,210	0,00554	0,213	0,00605
0,0007	0,193	0,00276	0,204	0,00361	0,214	0,00441	0,227	0,00599	0,231	0,00656
0,0008	0,207	0,00296	0,220	0,00389	0,230	0,00474	0,244	0,00644	0,249	0,00707
0,0009	0,222	0,00317	0,236	0,00418	0,247	0,00509	0,262	0,00692	0,267	0,00758
0,001	0,237	0,00339	0,252	0,00446	0,263	0,00542	0,279	0,00737	0,284	0,00807
0,002	0,333	0,00476	0,354	0,00627	0,370	0,00762	0,393	0,0104	0,400	0,0114
0,003	0,408	0,00583	0,433	0,00766	0,452	0,00931	0,480	0,0127	0,489	0,0139
0,004	0,467	0,00668	0,494	0,00874	0,518	0,0107	0,550	0,0145	0,560	0,0159
0,005	0,526	0,00752	0,559	0,00984	0,584	0,0120	0,620	0,0164	0,631	0,0179
0,006	0,571	0,00816	0,606	0,0107	0,634	0,0131	0,672	0,0177	0,685	0,0195
0,007	0,622	0,00889	0,661	0,0117	0,690	0,0142	0,733	0,0194	0,747	0,0213
0,008	0,659	0,00942	0,700	0,0124	0,732	0,0151	0,777	0,0205	0,791	0,0225
0,009	0,704	0,0101	0,748	0,0132	0,781	0,0161	0,829	0,0219	0,845	0,0240
0,01	0,741	0,0106	0,787	0,0139	0,822	0,0169	0,873	0,0230	0,889	0,0252
0,015	0,904	0,0129	0,960	0,0170	1,00	0,0206	1,07	0,0282	1,08	0,0307
0,02	1,045	0,0149	1,11	0,0196	1,16	0,0239	1,23	0,0325	1,25	0,0355
0,025	1,17	0,0167	1,24	0,0219	1,30	0,0268	1,38	0,0364	1,40	0,0398
0,03	1,28	0,0183	1,40	0,0248	1,42	0,0293	1,51	0,0399	1,54	0,0437
0,035	1,38	0,0197	1,48	0,0262	1,54	0,0317	1,63	0,0430	1,66	0,0471
0,04	1,48	0,0212	1,57	0,0275	1,64	0,0338	1,75	0,0462	1,78	0,0506
0,045	1,57	0,0224	1,67	0,0296	1,74	0,0358	1,85	0,0488	1,88	0,0534
0,05	1,65	0,0236	1,76	0,0311	1,83	0,0377	1,95	0,0515	1,98	0,0562
0,06	1,82	0,0260	1,93	0,0342	2,01	0,0414	2,14	0,0565	2,18	0,0619
0,07	1,96	0,0280	2,08	0,0368	2,18	0,0449	2,31	0,0610	2,36	0,0670
0,08	2,10	0,0300	2,23	0,0393	2,33	0,0480	2,47	0,0652	2,52	0,0716
0,09	2,22	0,0317	2,36	0,0418	2,47	0,0509	2,62	0,0692	2,67	0,0758
0,10	2,34	0,0333	2,49	0,0441	2,60	0,0536	2,76	0,0729	2,81	0,0798
0,12	2,56	0,0366	2,72	0,0481	2,84	0,0585	3,02	0,0797	3,08	0,0875
0,15	2,87	0,0410	3,05	0,0540	3,18	0,0655	3,38	0,0892	3,44	0,0977
0,20	3,31	0,0473	3,52	0,0623	3,67	0,0756	3,90	0,1030	3,97	0,1127

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

Diamètre 0m,20. Section 0mq,0314		Diamètre 0m,216 Section 0mq,0366		Diamètre 0m,23 Section 0mq,0415		Diamètre 0m,25 Section 0mq,0491		Diamètre 0m,27 Section 0mq,0573		Diamètre 0m,29 Section 0mq,066	
Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
095	0,00292	0,097	0,00355	0,100	0,00415	0,105	0,00516	0,109	0,00625	0,114	0,00752
150	0,00408	0,135	0,00494	0,140	0,00581	0,147	0,00722	0,153	0,00877	0,159	0,0105
157	0,00493	0,164	0,00600	0,170	0,00705	0,178	0,00874	0,186	0,0107	0,193	0,0127
185	0,00581	0,193	0,00706	0,200	0,00850	0,210	0,0103	0,218	0,0125	0,227	0,0150
204	0,00641	0,215	0,00780	0,220	0,00913	0,231	0,0113	0,240	0,0138	0,250	0,0165
221	0,00694	0,230	0,00842	0,240	0,00996	0,252	0,0124	0,262	0,0150	0,272	0,0180
241	0,00757	0,251	0,00919	0,260	0,0108	0,272	0,0134	0,284	0,0163	0,295	0,0195
259	0,00815	0,270	0,00988	0,280	0,0115	0,293	0,0144	0,306	0,0175	0,318	0,0210
278	0,00873	0,290	0,0106	0,300	0,0124	0,314	0,0154	0,328	0,0188	0,340	0,0224
296	0,00929	0,309	0,0113	0,320	0,0133	0,335	0,0164	0,349	0,0200	0,363	0,0240
407	0,0128	0,455	0,0159	0,450	0,0187	0,472	0,0232	0,491	0,0281	0,511	0,0337
509	0,0160	0,551	0,0194	0,550	0,0228	0,576	0,0283	0,601	0,0344	0,624	0,0412
583	0,0183	0,609	0,0223	0,630	0,0261	0,660	0,0324	0,688	0,0394	0,715	0,0472
657	0,0206	0,686	0,0251	0,710	0,0295	0,744	0,0365	0,775	0,0449	0,806	0,0532
715	0,0224	0,744	0,0272	0,770	0,0320	0,807	0,0396	0,841	0,0482	0,874	0,0577
777	0,0244	0,811	0,0297	0,840	0,0349	0,880	0,0432	0,917	0,0525	0,953	0,0629
824	0,0259	0,860	0,0315	0,890	0,0369	0,933	0,0458	0,972	0,0557	1,01	0,0667
880	0,0276	0,918	0,0336	0,950	0,0394	0,996	0,0489	1,04	0,0596	1,08	0,0713
926	0,0291	0,966	0,0354	1,00	0,0415	1,05	0,0516	1,09	0,0625	1,14	0,0752
13	0,0355	1,18	0,0452	1,22	0,0506	1,28	0,0628	1,33	0,0762	1,38	0,0911
30	0,0408	1,36	0,0498	1,41	0,0585	1,48	0,0727	1,54	0,0882	1,60	0,1056
6	0,0458	1,53	0,0560	1,58	0,0656	1,66	0,0815	1,73	0,0991	1,79	0,1181
0	0,0502	1,67	0,0611	1,73	0,0718	1,81	0,0889	1,89	0,1084	1,96	0,1294
3	0,0543	1,81	0,0662	1,87	0,0776	1,96	0,0952	2,04	0,1169	2,12	0,1399
85	0,0581	1,93	0,0706	2,00	0,0830	2,10	0,1031	2,18	0,1249	2,27	0,1498
96	0,0615	2,05	0,0750	2,12	0,0880	2,22	0,1090	2,32	0,1329	2,41	0,1591
06	0,0647	2,15	0,0787	2,23	0,0925	2,34	0,1149	2,43	0,1392	2,53	0,1670
26	0,0710	2,37	0,0867	2,45	0,1017	2,55	0,1252	2,68	0,1536	2,78	0,1855
45	0,0769	2,56	0,0937	2,65	0,1100	2,78	0,1365	2,89	0,1656	3,01	0,1987
62	0,0823	2,75	0,0999	2,83	0,1174	2,97	0,1458	3,09	0,1771	3,21	0,2119
78	0,0873	2,90	0,1061	3,00	0,1245	3,14	0,1542	3,28	0,1879	3,41	0,2251
95	0,0920	3,05	0,1115	3,16	0,1311	3,31	0,1625	3,45	0,1977	3,59	0,2369
19	0,1002	3,34	0,1222	3,46	0,1436	3,63	0,1782	3,78	0,2166	3,93	0,2594
58	0,1124	3,74	0,1369	3,87	0,1606	4,06	0,1993	4,25	0,2424	4,39	0,2997
03	0,1265	4,52	0,1581	4,47	0,1855	4,68	0,2298	4,88	0,2796	5,07	0,3346

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET							
	DIAMÈTRE 0m,30 SECTION 0mq,0707		DIAMÈTRE 0m,325 SECTION 0mq,083		DIAMÈTRE 0m,34 SECTION 0mq,0908		DIAMÈTRE 0m,36 SECTION 0mq,1018	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,116	0,0082	0,121	0,010	0,124	0,011	0,127	0,013
0,0002	0,162	0,0115	0,169	0,014	0,173	0,016	0,178	0,019
0,0003	0,197	0,0139	0,205	0,017	0,210	0,019	0,217	0,022
0,0004	0,231	0,0163	0,241	0,020	0,247	0,022	0,255	0,026
0,0005	0,254	0,0185	0,266	0,022	0,272	0,025	0,280	0,029
0,0006	0,277	0,0196	0,290	0,024	0,297	0,027	0,306	0,031
0,0007	0,301	0,0212	0,314	0,026	0,321	0,029	0,331	0,034
0,0008	0,324	0,0229	0,338	0,028	0,346	0,031	0,357	0,036
0,0009	0,347	0,0245	0,362	0,030	0,371	0,034	0,382	0,039
0,001	0,370	0,0262	0,386	0,032	0,396	0,036	0,408	0,042
0,002	0,520	0,0364	0,543	0,045	0,556	0,050	0,573	0,059
0,003	0,636	0,0460	0,664	0,055	0,680	0,062	0,701	0,071
0,004	0,728	0,0505	0,760	0,063	0,779	0,071	0,803	0,082
0,005	0,821	0,0581	0,857	0,071	0,878	0,079	0,905	0,092
0,006	0,890	0,0629	0,929	0,077	0,952	0,086	0,981	0,100
0,007	0,971	0,0686	1,01	0,084	1,04	0,094	1,07	0,109
0,008	1,03	0,0728	1,07	0,089	1,10	0,100	1,13	0,115
0,009	1,10	0,0778	1,15	0,095	1,17	0,106	1,21	0,123
0,01	1,16	0,0821	1,21	0,100	1,24	0,113	1,27	0,130
0,015	1,41	0,0997	1,47	0,122	1,51	0,137	1,55	0,158
0,02	1,63	0,115	1,70	0,141	1,74	0,150	1,80	0,183
0,025	1,83	0,129	1,91	0,159	1,95	0,177	2,01	0,205
0,03	2,00	0,141	2,09	0,173	2,14	0,194	2,20	0,224
0,035	2,16	0,153	2,26	0,187	2,31	0,219	2,38	0,242
0,04	2,31	0,163	2,41	0,200	2,47	0,224	2,55	0,260
0,045	2,45	0,174	2,56	0,212	2,62	0,238	2,70	0,275
0,05	2,58	0,182	2,69	0,223	2,76	0,251	2,81	0,286
0,06	2,83	0,200	2,96	0,246	3,03	0,275	3,11	0,317
0,07	3,06	0,217	3,20	0,266	3,27	0,297	3,38	0,344
0,08	3,27	0,231	3,42	0,283	3,50	0,318	3,61	0,367
0,09	3,47	0,245	3,62	0,300	3,71	0,337	3,82	0,389
0,10	3,65	0,258	3,81	0,316	3,91	0,355	4,03	0,410
0,12	4,00	0,283	4,18	0,342	4,28	0,389	4,41	0,449
0,15	4,47	0,316	4,67	0,388	4,78	0,405	4,93	0,502
0,20	5,17	0,366	5,40	0,448	5,52	0,501	5,69	0,580

BITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

ET.

DIAMÈTRE $0^m,58$ SECTION $0^{mq},1154$		DIAMÈTRE $0^m,40$ SECTION $0^{mq},1257$		DIAMÈTRE $0^m,42$ SECTION $0^{mq},1385$		DIAMÈTRE $0^m,44$ SECTION $0^{mq},152$		DIAMÈTRE $0^m,46$ SECTION $0^{mq},166$		DIAMÈTRE $0^m,48$ SECTION $0^{mq},181$	
Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	
0,015	0,135	0,017	0,138	0,019	0,142	0,022	0,145	0,024	0,148	0,027	
0,021	0,189	0,024	0,194	0,027	0,199	0,030	0,205	0,034	0,208	0,038	
0,025	0,229	0,029	0,235	0,033	0,241	0,037	0,247	0,041	0,252	0,046	
0,030	0,270	0,034	0,277	0,038	0,284	0,043	0,290	0,048	0,297	0,054	
0,035	0,297	0,037	0,304	0,042	0,312	0,047	0,319	0,053	0,326	0,061	
0,036	0,324	0,041	0,332	0,046	0,340	0,052	0,348	0,058	0,356	0,064	
0,039	0,350	0,044	0,360	0,050	0,369	0,056	0,375	0,062	0,386	0,070	
0,042	0,377	0,047	0,387	0,054	0,397	0,060	0,406	0,067	0,416	0,075	
0,044	0,404	0,051	0,415	0,057	0,425	0,064	0,435	0,072	0,444	0,080	
0,048	0,431	0,054	0,445	0,061	0,454	0,068	0,464	0,077	0,474	0,086	
0,067	0,607	0,076	0,622	0,086	0,638	0,097	0,655	0,108	0,668	0,119	
0,082	0,741	0,094	0,761	0,105	0,78	0,119	0,802	0,133	0,816	0,148	
0,094	0,849	0,107	0,871	0,123	0,893	0,136	0,914	0,152	0,935	0,169	
0,106	0,957	0,120	0,982	0,136	1,01	0,154	1,03	0,171	1,05	0,190	
0,115	1,04	0,131	1,06	0,147	1,09	0,166	1,13	0,187	1,15	0,208	
0,125	1,13	0,142	1,16	0,161	1,19	0,181	1,22	0,203	1,25	0,226	
0,133	1,20	0,151	1,23	0,170	1,26	0,192	1,29	0,214	1,32	0,239	
0,142	1,28	0,161	1,31	0,181	1,35	0,204	1,38	0,229	1,41	0,255	
0,149	1,35	0,170	1,38	0,191	1,42	0,216	1,45	0,241	1,48	0,268	
0,181	1,64	0,206	1,69	0,234	1,73	0,263	1,77	0,294	1,81	0,328	
0,210	1,90	0,239	1,95	0,270	2,00	0,304	2,05	0,340	2,09	0,378	
0,235	2,13	0,268	2,19	0,304	2,24	0,340	2,29	0,380	2,34	0,424	
0,250	2,35	0,293	2,39	0,331	2,45	0,371	2,51	0,417	2,57	0,465	
0,278	2,52	0,317	2,59	0,359	2,65	0,402	2,71	0,450	2,78	0,505	
0,297	2,70	0,340	2,77	0,384	2,83	0,430	2,90	0,481	2,97	0,538	
0,315	2,86	0,360	2,93	0,406	3,00	0,456	3,08	0,511	3,15	0,570	
0,332	3,01	0,378	3,08	0,427	3,16	0,470	3,24	0,538	3,31	0,599	
0,364	3,30	0,415	3,39	0,470	3,47	0,527	3,55	0,589	3,63	0,657	
0,395	3,57	0,439	3,66	0,507	3,76	0,572	3,85	0,639	3,92	0,719	
0,421	3,81	0,479	3,91	0,542	4,01	0,610	4,11	0,682	4,20	0,760	
0,447	4,04	0,508	4,15	0,575	4,25	0,645	4,35	0,722	4,44	0,804	
0,470	4,26	0,535	4,37	0,605	4,48	0,681	4,59	0,762	4,68	0,847	
0,514	4,66	0,586	4,79	0,663	4,90	0,745	5,02	0,835	5,12	0,927	
0,576	5,22	0,656	5,35	0,741	5,49	0,834	5,62	0,933	5,73	1,04	
0,665	6,03	0,758	6,18	0,856	6,34	0,964	6,49	1,08	6,63	1,26	

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET											
	Diamètre 0m,50 Section 0mq,196		Diamètre 0m,55 Section 0mq,238		Diamètre 0m,60 Section 0mq,283		Diamètre 0m,65 Section 0mq,332		Diamètre 0m,70 Section 0mq,385		Diamètre 0m,75 Section 0mq,442	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,152	0,030	0,159	0,038	0,167	0,047	0,174	0,058	0,182	0,070	0,187	0,083
0,0002	0,212	0,042	0,223	0,053	0,234	0,066	0,243	0,081	0,254	0,098	0,262	0,116
0,0003	0,258	0,053	0,271	0,064	0,284	0,080	0,295	0,098	0,309	0,119	0,318	0,141
0,0004	0,303	0,059	0,319	0,076	0,334	0,095	0,348	0,116	0,363	0,140	0,374	0,166
0,0005	0,334	0,065	0,351	0,084	0,367	0,104	0,382	0,127	0,400	0,154	0,412	0,182
0,0006	0,364	0,071	0,383	0,091	0,400	0,113	0,417	0,136	0,436	0,168	0,449	0,198
0,0007	0,394	0,077	0,414	0,101	0,434	0,123	0,452	0,150	0,472	0,182	0,487	0,215
0,0008	0,424	0,083	0,446	0,106	0,467	0,132	0,487	0,163	0,508	0,196	0,524	0,232
0,0009	0,455	0,089	0,478	0,114	0,500	0,141	0,521	0,176	0,545	0,210	0,562	0,248
0,001	0,485	0,095	0,510	0,121	0,534	0,151	0,556	0,185	0,581	0,224	0,599	0,265
0,002	0,682	0,133	0,717	0,171	0,751	0,213	0,782	0,261	0,817	0,315	0,842	0,362
0,003	0,854	0,163	0,877	0,209	0,917	0,260	0,956	0,317	0,999	0,385	1,03	0,456
0,004	0,955	0,187	1,00	0,238	1,05	0,297	1,09	0,362	1,14	0,439	1,18	0,522
0,005	1,08	0,212	1,13	0,269	1,18	0,334	1,23	0,408	1,29	0,497	1,33	0,588
0,006	1,17	0,229	1,23	0,303	1,28	0,362	1,35	0,448	1,40	0,539	1,44	0,656
0,007	1,27	0,252	1,34	0,319	1,40	0,396	1,46	0,485	1,53	0,589	1,57	0,694
0,008	1,35	0,265	1,42	0,338	1,48	0,419	1,55	0,515	1,62	0,624	1,67	0,738
0,009	1,44	0,282	1,51	0,359	1,58	0,447	1,65	0,548	1.73	0,666	1,79	0,791
0,01	1,52	0,298	1,59	0,378	1,67	0,462	1,74	0,581	1,82	0,701	1,87	0,827
0,015	1,85	0,363	1,93	0,459	2,03	0,575	2,12	0,704	2,22	0,856	2,28	1,01
0,02	2,14	0,419	2,25	0,536	2,35	0,665	2,45	0,813	2,56	0,909	2,64	1,17
0,025	2,40	0,460	2,52	0,600	2,64	0,747	2,75	0,913	2,87	1,10	2,96	1,31
0,03	2,62	0,514	2,75	0,655	2,89	0,818	3,01	0,999	3,14	1,21	3,24	1,43
0,035	2,83	0,555	2,98	0,709	3,12	0,883	3,25	1,08	3,40	1,31	3,50	1,55
0,04	3,03	0,593	3,19	0,759	3,34	0,945	3,48	1,16	3,63	1,40	3,74	1,65
0,045	3,21	0,629	3,40	0,809	3,54	1,02	3,68	1,22	3,85	1,47	3,97	1,75
0,05	3,38	0,662	3,57	0,850	3,72	1,05	3,88	1,29	4,05	1,56	4,17	1,84
0,06	3,71	0,727	3,91	0,931	4,09	1,16	4,26	1,41	4,45	1,72	4,59	2,03
0,07	4,02	0,788	4,22	1,00	4,42	1,25	4,61	1,59	4,81	1,85	4,96	2,19
0,08	4,29	0,841	4,51	1,07	4,72	1,34	4,93	1,64	5,14	1,98	5,30	2,34
0,09	4,55	0,812	4,78	1,14	5,00	1,42	5,21	1,73	5,45	2,10	5,62	2,48
0,10	4,79	0,939	5,04	1,20	5,27	1,49	5,49	1,82	5,74	2,21	5,92	2,62
0,12	5,25	1,03	5,52	1,31	5,77	1,63	6,01	2,00	6,28	2,42	6,48	2,85
0,15	5,87	1,15	6,17	1,47	6,46	1,83	6,75	2,25	7,05	2,71	7,24	3,21
0,20	6,78	1,33	7,13	1,70	7,46	2,11	7,77	2,58	8,12	3,33	8,37	3,70

DITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

...mètre 0m,80 ...tion 0mq,503		Diamètre 0m,85 Section 0mq,567		Diamètre 0m,90 Section 0mq,636		Diamètre 0m,95 Section 0mq,709		Diamètre 1m,00 Section 0mq,785		Diamètre 1m,20 Section 1mq,13		Diamètre 1m,50 Section 1mq,77	
...se	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
94	0,098	0,200	0,113	0,206	0,131	0,211	0,150	0,217	0,170	0,245	0,277	0,274	0,485
71	0,136	0,280	0,159	0,288	0,183	0,296	0,210	0,304	0,239	0,345	0,387	0,383	0,678
29	0,165	0,339	0,193	0,350	0,223	0,359	0,255	0,369	0,290	0,417	0,471	0,465	0,823
87	0,195	0,399	0,226	0,411	0,261	0,423	0,300	0,434	0,341	0,490	0,554	0,548	0,970
86	0,214	0,439	0,249	0,452	0,286	0,465	0,330	0,478	0,375	0,539	0,620	0,603	1,07
85	0,234	0,479	0,272	0,493	0,314	0,507	0,359	0,521	0,409	0,588	0,654	0,657	1,16
05	0,253	0,518	0,293	0,535	0,340	0,550	0,390	0,564	0,443	0,657	0,719	0,712	1,26
42	0,273	0,559	0,347	0,576	0,366	0,592	0,420	0,608	0,477	0,686	0,775	0,767	1,36
81	0,292	0,599	0,340	0,617	0,392	0,634	0,450	0,651	0,511	0,735	0,831	0,822	1,46
80	0,312	0,639	0,362	0,658	0,418	0,676	0,479	0,695	0,546	0,784	0,886	0,876	1,56
71	0,438	0,899	0,509	0,922	0,586	0,951	0,674	0,997	0,783	1,10	1,14	1,23	2,18
06	0,533	1,10	0,624	1,13	0,719	1,16	0,822	1,19	0,954	1,35	1,53	1,51	2,67
52	0,614	1,26	0,704	1,30	0,827	1,33	0,941	1,37	1,08	1,54	1,74	1,73	3,06
37	0,669	1,42	0,806	1,46	0,928	1,50	1,06	1,54	1,21	1,74	1,97	1,94	3,43
49	0,749	1,54	0,873	1,58	1,00	1,63	1,16	1,67	1,31	1,89	2,14	2,11	3,73
53	0,820	1,68	0,953	1,73	1,10	1,78	1,26	1,82	1,43	2,06	2,33	2,30	4,07
72	0,865	1,78	1,01	1,83	1,16	1,88	1,33	1,93	1,52	2,18	2,46	2,44	4,32
94	0,926	1,90	1,08	1,95	1,24	2,01	1,43	2,06	1,62	2,35	2,63	2,60	4,60
94	0,982	2,00	1,13	2,01	1,28	2,11	1,50	2,17	1,70	2,45	2,77	2,74	4,85
56	1,19	2,44	1,38	2,51	1,60	2,58	1,83	2,65	2,08	2,99	3,38	3,34	5,91
75	1,37	2,82	1,60	2,90	1,83	2,98	2,11	3,06	2,40	3,45	3,80	3,86	6,83
06	1,54	3,16	1,78	3,25	2,07	3,34	2,37	3,43	2,69	3,87	4,37	4,35	7,66
55	1,69	3,45	1,96	3,56	2,26	3,66	2,59	3,76	2,95	4,24	4,79	4,74	8,39
62	1,82	3,73	2,12	3,84	2,44	3,96	2,81	4,06	3,19	4,58	5,18	5,02	8,89
87	1,95	3,99	2,26	4,11	2,61	4,23	3,00	4,34	3,41	4,90	5,54	5,48	9,70
10	2,06	4,23	2,40	4,36	2,77	4,48	3,18	4,60	3,61	5,19	5,86	5,81	10,28
32	2,17	4,45	2,52	4,58	2,91	4,71	3,34	4,84	3,80	5,46	6,17	6,11	10,81
74	2,48	4,89	2,77	5,04	3,21	5,18	3,67	5,32	4,18	6,00	6,78	6,63	11,74
15	2,57	5,29	3,00	5,45	3,47	5,60	3,97	5,75	4,50	6,49	7,33	7,23	12,80
48	2,76	5,65	3,20	5,82	3,70	5,99	4,25	6,14	4,81	6,93	7,83	7,75	13,72
81	2,92	5,99	3,40	6,17	3,92	6,34	4,50	6,51	5,11	7,35	8,31	8,22	14,55
12	3,08	6,31	3,58	6,50	4,13	6,68	4,73	6,86	5,39	7,74	8,75	8,66	15,33
70	3,37	6,91	3,92	7,11	4,52	7,31	5,18	7,51	5,90	8,48	9,58	9,48	16,78
48	3,76	7,73	4,38	7,96	5,06	8,19	5,61	8,40	6,60	9,48	10,71	10,60	18,76
35	4,35	8,93	5,06	9,19	5,84	9,45	6,70	9,70	7,61	10,95	12,37	12,24	21,66

La table III a été établie au moyen de la formule

$$rj = b_1 u^2 \tag{1}$$

dans laquelle on a donné au coefficient b_1 des valeurs doubles de celles qui conviennent aux tuyaux neufs.

Cette table est à double entrée : la charge et le diamètre. Nous avons pris des charges variant de $0^m,0001$ à $0^m,20$ par mètre ; comme c'est dans le cas des petites charges que la précision est surtout désirable, nous avons considéré : 1° celles qui varient de dixième en dixième de millimètre de $0^m,0001$ à $0^m,001$; 2° celles qui varient de millimètre en millimètre de $0^m,001$ à $0^m,01$; 3° celles qui varient de 5 en 5 millimètres de $0^m,01$ à $0^m,05$; 4° celles qui varient de centimètre en centimètre de $0^m,05$ à $0^m,10$; 5° et enfin les charges de $0^m,12$, $0^m,15$, $0^m,20$, qui ne peuvent se rencontrer dans la pratique que d'une manière exceptionnelle.

Les données ordinaires du problème de la distribution sont la charge disponible et le débit qu'on veut obtenir, et ces deux quantités sont liées par la relation

$$j = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5}; \tag{2}$$

mais le coefficient b_1 dépendant de r, l'emploi de cette formule exige une série de tâtonnements; elle conduisait donc à de trop longs calculs.

C'est ce qui nous a conduit à adopter pour entrées la charge et le rayon ; les trois quantités r, j, b, sont alors connues dans la formule (1), on en déduit la vitesse u qui, multipliée par la section, donne le débit.

M. Mary, dans son Cours autographié de l'École des Ponts et Chaussées, a donné une table analogue à celle que nous présentons : elle a pour entrées le débit et le diamètre. Elle a été calculée au moyen des formules et tables de de Prony.

Les résultats numériques qu'elle donne ne sont donc pas conformes à la théorie de Darcy.

En effet, ces résultats diffèrent de ceux que fournit notre table III; la concordance s'établit à peu près pour les petits et les grands diamètres, mais avec notre table les résultats sont toujours inférieurs à ceux qu'on obtient avec la table de M. Mary. La différence est pour les diamètres moyens de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{6}$.

Pour une charge de 0,0002 et un diamètre de $0^m,30$, la table de M. Mary donne une vitesse de $0^m,18$ et un débit de $0^m,013$.

Pour la même charge de $0^m,0002$ et le même diamètre $0^m,30$, notre table donne une vitesse de $0^m,16$ et un débit de $0^m,012$.

Pour une charge de $0^m,001$ et un diamètre de $0^m,30$, la table de M. Mary donne une vitesse de $0^m,44$ et un débit de $0^m,031$, tandis que notre table donne une vitesse de $0^m,37$ et un débit de $0^m,026$.

Cette comparaison montre que l'on risque moins de se tromper en se servant de notre table pour calculer une distribution d'eau qu'en ayant recours à la table de M. Mary.

Sans doute, les pertes de charge seront beaucoup moindres que le calcul ne le suppose pendant les premiers temps que les tuyaux seront en service, mais

c'est surtout en vue de l'avenir que la distribution d'eau doit être établie, et, avec les résultats des tables, on n'aura point de mécomptes à redouter.

Nous aurions pu traduire les tables précédentes en tableaux graphiques anamorphosés, mais tous ceux qui se sont servis de tableaux graphiques savent combien l'usage en est peu commode ; pour les rendre facilement maniables, il faudrait les construire à grande échelle avec des lignes de couleurs variées ; à petite échelle, avec des lignes noires, les tableaux graphiques sont très-confus et peuvent donner lieu à des erreurs.

USAGES DE LA TABLE III

La table III permet de résoudre immédiatement les six problèmes que nous avons étudiés au chapitre premier et qui résultent de la combinaison des quatre quantités :

Le rayon r de la conduite, la charge j par mètre courant, la vitesse moyenne u et le débit q.

Ces quatre quantités sont liées par deux équations, de sorte que deux d'entre elles étant données, on peut calculer les deux autres.

Cela donne lieu à six problèmes ; deux seulement sont intéressants au point de vue pratique.

Premier problème. — *Connaissant le rayon d'une conduite et la charge par mètre courant, déterminer la vitesse moyenne et le débit.*

Soit une conduite de $0^m,20$ de diamètre, ou de $0^m,10$ de rayon, soumise à une charge de $0^m,001$ par mètre; cherchons sur la ligne horizontale supérieure de la table le diamètre $0^m,20$ et descendons les deux colonnes verticales correspondantes jusqu'à la ligne horizontale correspondant à la charge $0^m,001$, nous trouvons pour la valeur de la vitesse $0^m,296$ et pour la valeur du débit $0^{mc},00929$ soit 9 litres 29 centilitres, à la seconde.

Si les données ne se trouvent pas exactement dans les tables, on procède par interpolation, dans la forme ordinaire. Exemple : prenons avec le même diamètre la charge $0^m,0012$, la vitesse sera comprise entre $0^m,296$ et $0^m,407$, et le débit entre $0^m,00929$ et $0^m,0128$. Les différences sont $0^m,111$ et $0^m,00351$, dont les deux dixièmes sont égaux à $0^m,0222$ et $0^m,0007$; la vitesse sera donc de :

$$0,296+0,0222=0,0318$$

et le débit

$$0,00929+0,0007=0,00999$$

Deuxième problème. — *Connaissant la charge disponible et le débit à obtenir, on demande le rayon et la vitesse.*

Soit une charge de $0^m,001$ et un débit de 15 litres à la seconde, ou de $0^m,015$; suivons la ligne horizontale qui commence par $0^m,001$ jusqu'à ce que nous rencontrions le débit $0^m,015$, nous voyons qu'il correspond à un tuyau d'un diamètre intermédiaire entre $0^m,23$ et $0^m,25$; nous adopterons donc un diamètre de $0^m,24$, et la vitesse moyenne sera comprise entre $0^m.32$ et 0,335. Cette approximation est bien suffisante, eu égard à l'approximation des nombres fournis par l'expérience.

Calcul d'une distribution d'eau. — Il est facile maintenant de calculer

tous les éléments d'une artère : on part de l'extrémité de cette artère, on la divise par sections, et dans chaque section on détermine le débit.

On doit s'attacher à prendre comme base le débit maximum qui peut se produire : ainsi, il faut compter que toutes les bornes-fontaines seront ouvertes et débiteront chacune un litre par seconde, ainsi que les bouches d'arrosage, ce qui est la condition indispensable d'un bon fonctionnement. On évaluera avec soin les causes de consommation locales, telles que concession à une usine importante, alimentation d'un bassin, d'un jet d'eau, puis on ajoutera les quantités nécessaires au service des concessions futures, en tenant compte de l'importance des maisons et du nombre des habitants qu'elles peuvent renfermer, en tenant compte aussi, dans certains cas, de l'étendue des jardins à arroser.

Il va sans dire qu'il convient de se tenir très au large dans ces évaluations.

Partant de l'extrémité de l'artère, on saura quelle doit être la charge disponible à cette extrémité; de la connaissance du débit, on déduira le diamètre de la première section et la charge qu'il faut obtenir à son origine ; de même pour la seconde section, et ainsi de suite, en remontant jusqu'au réservoir d'alimentation, dont le niveau se trouvera ainsi déterminé.

Nous engageons le lecteur à effectuer un calcul de ce genre, nous lui en avons fourni tous les éléments.

Conduite réunissant deux réservoirs. — Les formules relatives à une conduite qui réunit deux réservoirs, sans rien dépenser en route, sont données à la page 38 et accompagnées d'une application numérique, qu'il est inutile de reproduire.

Pertes de charge produites par les changements de diamètre, les branchements et les coudes. — Ces pertes de charge sont évaluées à la page 22 et aux pages suivantes.

Conduites équivalentes. — Une conduite ayant 1,000 mètres de longueur a un rayon de $0^m,15$ sur 150 mètres, de $0^m,20$ sur 250 mètres, de $0^m,10$ sur 400 mètres, et de $0^m,08$ sur 200 mètres, trouver une conduite équivalente de même longuenr.

Le rayon de cette conduite est déterminé par la formule page 27 :

$$\frac{L}{R^5} = \frac{l}{r^5} + \frac{l'}{r'^5} + \frac{l''}{r''^5} + \ldots$$

La table II nous donne les valeurs des inverses des cinquièmes puissances des rayons et facilite le calcul. Le rayon R résulte de l'équation :

$$\frac{1}{R^5} = \frac{1}{1000}\,[150 \times 13168 + 250.3125 + 400.100000 + 200.305175] = 73278$$

et la table II nous apprend que R est compris entre $0^m,10$ et $0^m,108$. Le problème est donc rapidement résolu.

Nous avons donné cet exemple numérique afin de bien faire saisir tout le parti qu'on peut tirer de la table II.

Le lecteur pourra, grâce à cette table, faire rapidement l'application des formules exposées au chapitre premier, et notamment des formules qui se rapportent à l'alimentation par plusieurs réservoirs.

TABLE IV

RELATIONS ENTRE LES VOLUMES D'EAU A ÉCOULER SUIVANT L'UNITÉ DE TEMPS

VOLUMES D'EAU A ÉCOULER, EXPRIMÉS EN MÈTRES CUBES				
PAR SECONDE	PAR MINUTE	PAR HEURE	PAR JOUR	PAR AN
mc.	mc.	mc.	mc.	mc.
0,00002	0,0012	0,072	1,728	631
0,00004	0,0024	0,144	3,456	1261
0,00006	0,0036	0,216	5,184	1892
0,00008	0,0048	0,288	6,912	2525
0,0001	0,0060	0,360	8,640	3154
0,0002	0,012	0,720	17,28	6307
0,0003	0,018	1,08	25,92	9461
0,0004	0,024	1,44	34,56	12614
0,0005	0,030	1,80	43,20	15768
0,0006	0,036	2,16	51,84	18922
0,0007	0,042	2,52	60,48	22075
0,0008	0,048	2,88	69,12	25229
0,0009	0,054	3,24	77,16	28382
0,001	0,060	3,60	86,40	31536
0,002	0,120	7,20	173	63072
0,003	0,180	10,80	259	94608
0,004	0,240	14,40	346	126144
0,005	0,300	18,00	432	157680
0,006	0,360	21,60	518	189216
0,007	0,420	25,20	605	220752
0,008	0,480	28,80	691	252288
0,009	0,540	32,40	778	283824
0,010	0,600	36	864	315360
0,020	1,2	72	1728	630720
0,030	1,8	108	2592	946080
0,040	2,4	144	3456	1261440
0,050	3,0	180	4320	1576800
0,060	3,6	216	5184	1892160
0,070	4,2	252	6048	2207520
0,080	4,8	288	6912	2522880
0,090	5,4	324	7776	2838840
0,100	6	360	8640	3153600
0,200	12	720	17280	6307200
0,300	18	1,080	25920	9460800
0,400	24	1,440	34560	12614400
0,500	30	1,800	43200	15768000
0,600	36	2,160	51840	18921600
0,700	42	2,520	60480	22075200
0,800	48	2,880	69120	25228800
0,900	54	3,240	77760	28382400
1,000	60	3,600	86400	31536000